

**UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE**

Přírodovědecká fakulta

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie

Studijní program: Geografie (navazující magisterské studium)

Studijní obor: Kartografie a geoinformatika



Bc. Tereza Poláková

## **VYUŽITÍ DOPLŇKOVÝCH INFORMACÍ O PULSU PRO KLASIFIKACI DAT LLS V ČLENITÉM TERÉNU**

UTILIZATION OF ADDITIONAL INFORMATION ON THE PULSE FOR ALS  
DATA CLASSIFICATION IN RUGGED TERRAIN

Diplomová práce

Praha 2016

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Jakub Lysák

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně, pod vedením školitele RNDr. Jakuba Lysáka, a že jsem uvedla a řádně citovala všechny použité prameny. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

Jsem si vědoma toho, že případné použití výsledků získaných v této práci mimo Univerzitu Karlovu v Praze je možné pouze po písemném souhlasu této univerzity.

Svoluji k zapůjčení této práce pro studijní účely a souhlasím s tím, aby byla řádně vedena v evidenci vypůjčovatelů.

V Postupicích dne 25. 7. 2016

.....  
Tereza Poláková

### **Poděkování**

*Na tomto místě bych ráda upřímně poděkovala vedoucímu diplomové práce RNDr. Jakubu Lysákovi za vstřícnou spolupráci, cenné rady, připomínky, ochotu a především čas, který mi věnoval. Rovněž bych ráda poděkovala Zeměměřickému úřadu za zapůjčení dat nezbytných pro vypracování této práce. Děkuji také svým nejbližším za podporu při zpracování práce i v průběhu celého studia.*

# **Využití doplňkových informací o pulsu pro klasifikaci dat LLS v členitém terénu**

## **Abstrakt**

Práce se zabývá problematikou filtrace dat leteckého laserového skenování v oblasti skalních měst, která jsou charakteristická velkou členitostí a na našem území i poměrně hustou vegetací, která znesnadňuje průchod laserového paprsku k povrchu, což může vést k nižší přesnosti vznikajícího DMR. V první části práce jsou představeny základní filtrační metody, které jsou systematicky uspořádány do několika skupin. Důraz je kladen i na teoretické problémy, se kterými je nutné počítat při filtraci bodového mračka právě v oblasti skalních měst. Hlavním cílem práce je pak navrhnout změny v některém ze stávajících algoritmů tak, aby byly využity i doplňkové informace o pulsu (především amplituda a šířka odrazu), a otestovat tento postup nad reálnými daty. V závěru jsou výsledky metody a jejich implementace kriticky zhodnoceny.

**Klíčová slova:** letecké laserové skenování, segmentace bodového mračka, klasifikace bodového mračka, skalní město, DMR

# **Utilization of additional information of the pulse for ALS data classification in ragged terrain**

## **Abstract**

The diploma thesis deals with airborne laser scanning filtering problem in sandstone landscape which is characterized by ragged terrain and in our country also by dense vegetation that makes difficult to transit laser pulse to terrain that can lead to lower accuracy of created DTM. In the first part the basic filtering algorithm that are systematic divided into several groups are described. The emphasis is also put on theoretic problems which we have to deal with during the filtering of laser scanner data acquired in sandstone landscape. The main goal of the thesis is to suggest changes in one of the existing algorithm to additional information of the pulse (mainly amplitude and width of the pulse) be used, and to test this method over the real data. At the end the results of the method and its implementation are critically evaluated.

**Keywords:** airborne laser scanning, point cloud segmentation, point cloud classification, sandstone landscape, DTM

## OBSAH

<b>Obsah.....</b>	<b>6</b>
<b>Přehled použitých zkratk .....</b>	<b>8</b>
<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>9</b>
<b>Seznam tabulek.....</b>	<b>11</b>
<b>1 Úvod .....</b>	<b>12</b>
<b>2 Filtrace dat leteckého laserového skenování .....</b>	<b>14</b>
2.1 Jednoduché filtry.....	16
2.2 Morfologické filtry.....	16
2.3 Filtry založené na postupném zhušťování.....	17
2.4 Filtry založené na odhadu povrchu.....	18
2.4.1 Hierarchická robustní interpolace .....	19
2.5 Segmentačně založená filtrace.....	22
2.5.1 Scan line segmentation .....	22
2.5.2 Seeded region growing .....	23
2.5.3 Clustering .....	26
2.6 Multiple-entity based klasifikace .....	27
2.7 Problémy filtrace dat LLS ve skalních oblastech .....	29
<b>3 Zájmová území a data .....</b>	<b>33</b>
3.1 Zájmová území.....	33
3.1.1 České Švýcarsko.....	33
3.1.2 Prachovské skály .....	34
3.2 Data a jejich předzpracování .....	36
3.2.1 České Švýcarsko.....	37
3.2.2 Prachovské skály .....	38

<b>4</b>	<b>Metodika zpracování .....</b>	<b>40</b>
4.1	Princip navržené metodiky .....	41
4.1.1	Relativizace hodnot $A, W$ .....	42
4.1.2	Testování iniciálního bodu .....	42
4.1.3	Tvorba zárodku shluku.....	44
4.1.4	Rozrůstání shluku .....	44
4.1.5	Klasifikace shluků .....	47
4.2	Modifikace shlukovacího algoritmu.....	49
4.2.1	Výšková odchylka.....	49
4.2.2	Průběžná aktualizace matic pro výpočet Mahalanobisovy vzdálenosti .....	50
<b>5</b>	<b>Výsledky a hodnocení.....</b>	<b>51</b>
5.1	Výsledky .....	51
5.1.1	Segmentace.....	51
5.1.2	Klasifikace .....	54
5.2	Hodnocení.....	57
5.2.1	Segmentace.....	57
5.2.2	Klasifikace .....	60
<b>6</b>	<b>Diskuze .....</b>	<b>64</b>
<b>7</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>69</b>
	<b>Použité zdroje .....</b>	<b>71</b>
	<b>Seznam příloh .....</b>	<b>76</b>

## **PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK**

<b>ČÚZK</b>	Český úřad zeměměřický a katastrální
<b>DMP</b>	digitální model povrchu
<b>DMP 1G</b>	digitální model povrchu 1. generace
<b>DMR</b>	digitální model reliéfu
<b>DMR 4G</b>	digitální model reliéfu 4. generace
<b>DMR 5G</b>	digitální model reliéfu 5. generace
<b>DTM</b>	digital terrain model
<b>FWF</b>	full-waveform
<b>CHKO</b>	chráněná krajinná oblast
<b>LiDAR</b>	Light Detection And Ranging
<b>LLS</b>	letecké laserové skenování
<b>MD</b>	Mahalanobis distance (Mahalanobisova vzdálenost)
<b>NP</b>	národní park
<b>PR</b>	přírodní rezervace
<b>PS</b>	Prachovské skály
<b>RMSE</b>	root mean square error (střední kvadratická chyba)

## SEZNAM OBRÁZKŮ

obr. 1: Několikanásobný odraz a FWF.....	14
obr. 2: Několikanásobný odraz paprsku.....	15
obr. 3: Výsledek morfologického filtru podle Lindenbergera .....	16
obr. 4: Příklad funkce pro výpočet sklonu.....	17
obr. 5: Zhušťování TIN podle Axelssona .....	18
obr. 6: Robustní interpolace – váhová funkce $p$ .....	18
obr. 7: Kroky hierarchické robustní interpolace.....	19
obr. 8: Tvorba DMR podle autorů Doneus, Briese.....	20
obr. 9: Tvorba DMR podle autorů Mandlbürger, Briese, Pfeifer.....	21
obr. 10: Schéma metody scan line segmentation.....	23
obr. 11: Dílčí výstupy segmentačně založené robustní interpolace .....	24
obr. 12: Segmentačně řízená filtrace bodového mračka podle Mückeho.....	25
obr. 13: Klasifikace bodového mračka podle Vosselmana, a kol.....	28
obr. 14: Ukázka typické krajiny terénu skalního města.....	29
obr. 15: Profil daty LLS vedený v okolí Pravčické brány .....	30
obr. 16: Ukázka nerovnoměrné hustoty bodů v členitém terénu .....	30
obr. 17: Multipath efekt.....	31
obr. 18: Histogramy hodnot kritéria $C$ .....	32
obr. 19: Testovací lokalita České Švýcarsko .....	33
obr. 20: Pravčická brána .....	34
obr. 21: Prachovské skály.....	35
obr. 22: Testovací lokalita Prachovské skály.....	36
obr. 23: Vizualizace dat Českého Švýcarska získaných od ZÚ .....	37
obr. 24: Vizualizace dat Prachovských skal získaných od ZÚ .....	38
obr. 25: Vliv vlhkosti na velikost amplitudy .....	41
obr. 26: Relativizace hodnot $A$ , $W$ bodů v souboru .....	42
obr. 27: Odlehlý bod označený jako samostatný shluk .....	43
obr. 28: Princip rozrůstání shluku.....	45



obr. 29: Srovnání eukleidovské a Mahalanobisovy vzdálenosti .....	46
obr. 30: Přesnost určení šířky odrazu .....	47
obr. 31: Histogramy kritéria C .....	48
obr. 32: Výškové kritérium – modelový příklad .....	50
obr. 33: České Švýcarsko – varianta 5 – vybrané rozsáhlé shluky představující terén .....	52
obr. 34: České Švýcarsko – varianta 8 – falešně neklidný terén.....	52
obr. 35: PS-střed, 2010 – varianta 1 – chybně vytvořený shluk představující terén.....	53
obr. 36: České Švýcarsko – varianta 2 – chybně klasifikované rozsáhlé segmenty.....	55
obr. 37: České Švýcarsko – varianta 5 – demonstrace situace na okrajích skalních plošin .....	56
obr. 38: PS-střed, 2008 – varianta 1 – skalní věž v DMR 5G a vytvořeném DMR.....	57
obr. 39: Graf funkce výpočtu váhy shluku .....	58
obr. 40: Graf závislosti počtu shluků na kvalitě segmentace .....	60
obr. 41: Vybrané opakující se chyby (varianta 2).....	61

## SEZNAM TABULEK

tab. 1: Kategorie povrchu a jejich vlastnosti.....	26
tab. 2: Atributy použité při výpočtu entit.....	27
tab. 3: Atributy dat získaných od ZÚ .....	37
tab. 4: Konstanty posunu ve 3D .....	39
tab. 5: Hlavní kroky shlukovacího algoritmu.....	41
tab. 6: Průměrná vzdálenost bodů.....	43
tab. 7: Konstanty získané v programu R.....	48
tab. 8: Množství chybně klasifikovaných bodů jiných než posledních odrazů .....	49
tab. 9: Použité varianty parametrů pro testování shlukovacího algoritmu – České Švýcarsko .....	51
tab. 10: Dosažené výsledky jednotlivých variant – České Švýcarsko .....	52
tab. 11: Použité varianty parametrů pro testování shlukovacího algoritmu – Prachovské skály .....	53
tab. 12: Dosažené výsledky jednotlivých variant – Prachovské skály .....	54
tab. 13: Parametry použité při klasifikaci segmentů dat – České Švýcarsko .....	54
tab. 14: Parametry použité při klasifikaci segmentů dat – Prachovské skály.....	55
tab. 15: Míra homogenity shluků jednotlivých variant – České Švýcarsko.....	59
tab. 16: Míra homogenity shluků jednotlivých variant – Prachovské skály .....	59
tab. 17: Kvalita segmentace jednotlivých variant – České Švýcarsko .....	59
tab. 18: Kvalita segmentace jednotlivých variant – Prachovské skály.....	59
tab. 19: Doporučené parametry segmentačního algoritmu .....	60
tab. 20: Statistické ukazatele hodnocení kvality klasifikace – České Švýcarsko.....	62
tab. 21: Statistické ukazatele hodnocení kvality klasifikace – Prachovské skály .....	62

# 1 Úvod

Přestože byl laser vynalezen již na začátku 60. let, zabránil jeho využití v mapování několik dalších desetiletí nedostatek různých podpůrných technologií. Klíčovými body pro rozvoj systémů laserového profilování a skenování k topografickým účelům bylo představení metody přímého georeferencování v polovině 90. letech a obecný vývoj počítačové techniky. Využití laserového skenování právě k topografickému mapování začalo po dlouhém předcházejícím období výzkumů týkajících se vhodných technologií a nástrojů (Shan, Toth, 2009). Laserové skenování je v posledních 10 – 15 letech předmětem velkého rozvoje a za tu dobu se bezpochyby stalo jednou z nejvýznamnějších nových technologií pro získávání prostorových dat a pro mapování rozsáhlých území.

Pomocí dat laserového skenování lze například sledovat dráty elektrického vedení, měřit výšku lesního porostu nebo mapovat komunikace. Uplatnění metoda nachází i v oblasti architektury při přípravě a zpracování dokumentace historických budov a v oblasti archeologie při zaměřování archeologických a kulturních památek (Land management, 2011). Jinou oblastí využití dat je tvorba digitálních modelů reliéfu (DMR). DMR jsou využívány při tvorbě ortofotomapy nebo při spektrální korekci družicových či leteckých snímků, například k odstranění vlivu zastínění (Dolanský, 2004). Jinou možností aplikace DMR je tvorba 3D modelu města nebo různých jiných pohledových studií. Využití nachází data také při výpočtu a konstrukci dopravních staveb jako jsou silnice, železnice, mosty a další.

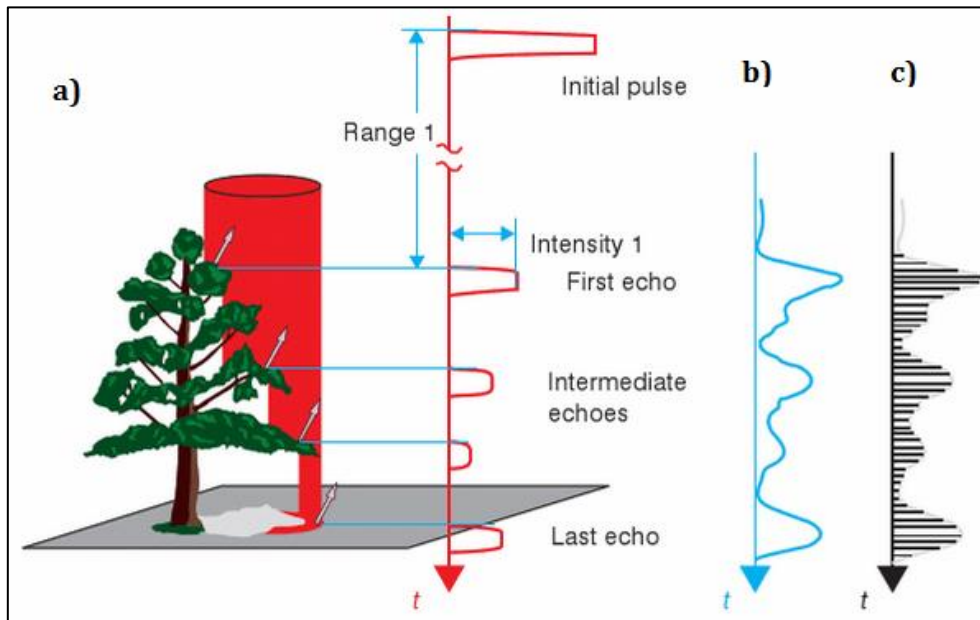
Ruku v ruce s postupným rozšiřováním uplatnění DMR se také nabízí otázka jejich přesnosti. Oproti fotogrammetrii laserové skenování poskytuje dobré výsledky i v zalesněných oblastech, protože ke vzniku prostorového vjemu při laserovém skenování stačí odraz paprsků od terénu z jediného směru, proto je pravděpodobnost zaměření polohy bodu na terénu u laserového skenování podstatně vyšší (Dolanský, 2004). Výhodou LiDARu také je, že zpracování naměřených dat je dobře automatizovatelné, což způsobuje rychlé zavádění technologie do různých aplikací. Jistou nevýhodou ovšem je značný objem nasbíraných 3D dat, byť s relativně velkou přesností. Metod, jak z takto nasbíraných výškopisných dat odvodit DMR, existuje velké množství, ovšem předmětem intenzivního výzkumu jsou i budou nadále, protože doposud nebyl plně využit potenciál lidarových dat (Shan, Toth, 2009).

Obecně platí, že v nepříliš členitém terénu podávají algoritmy dobré výsledky, avšak problémy nastávají na místech se strmými zalesněnými svahy. A právě takovému typu krajiny se bude věnovat tato práce. Hlavním cílem práce je ověřit možnosti využití doplňkových informací o pulsu, zejména amplitudy a šířky odrazu, nad reálnými daty. Data použitá k testování pokrývají oblasti pískovcových skalních měst, která splňují požadavky jak na členitost území, tak hustou vegetaci. Dílčími cíli je pak prozkoumání stávajících algoritmů na filtraci/klasifikaci a jejich omezení v členitém terénu, a dále prozkoumání studií, které se zabývají využitím doplňkových informací o pulsu.

Úvodní teoretická část práce seznamuje s filtračními metodami dat leteckého laserového skenování. Uvedeny jsou jak jednodušší metody, založené pouze na geometrii, tak i ty sofistikovanější, které mohou využívat i doplňkové informace o pulsu. Metody jsou rozdělené do šesti skupin podle toho, na jakém principu jsou založeny. Závěr kapitoly je věnován teoretickým problémům, se kterými je nutné počítat při filtraci bodového mračka v oblasti skalních měst. Ve třetí kapitole jsou charakterizované testované lokality, přičemž důraz je kladen i na jejich geologický vývoj, který určil dnešní členitý charakter území, jenž je pro tuto práci podstatný. Dále jsou popsána použitá data. Ve čtvrté kapitole je představena navržená filtrační metoda založená na segmentačním přístupu, konkrétně na principu region-growing, s následnou klasifikací podle Lysáka (2016). Popsány jsou všechny podstatné kroky metody, včetně vlivu jednotlivých kritérií na výslednou podobu shluků a provedených modifikací v základním algoritmu. V následující části práce jsou pak uvedeny dosažené výsledky, které jsou podloženy obrázky i tabulkami. V druhé části téže kapitoly jsou pak tyto výsledky zhodnoceny. V závěrečných kapitolách probíhá sumarizace dosažených výsledků a diskuze nad nimi. Také jsou podány návrhy na možná vylepšení.

## 2 FILTRACE DAT LETECKÉHO LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ

Letecké laserové skenování (LLS) patří mezi hojně využívanou technologii pořízení dat pro tvorbu DMR u nás i ve světě. Metoda je založena na určování geocentrických souřadnic  $[x, y, z]$  bodů na zemském povrchu. Principem metody je výpočet vzdálenosti mezi skenerem, který je připevněn na pohybujícím se nosiči, a zemským povrchem, popř. objektech na něm. Tato vzdálenost je vypočítávána z času mezi vysláním a přijetím odraženého laserového paprsku. Pozice skeneru je určena pomocí diferenční GPS v souřadnicovém referenčním systému WGS 84 a směr laserového paprsku pomocí inerciální měřící jednotky (Dolanský, 2004).



obr. 1: Několikanásobný odraz a FWF

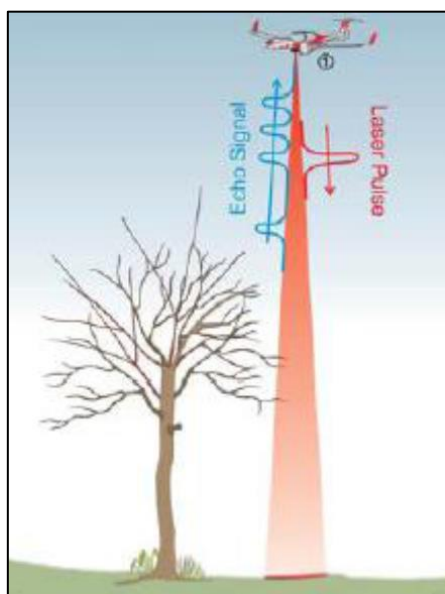
a) diskretní pulz, b) vlna, c) digitalizovaná vlna, zdroj: Beraldin, Blais, Lohr (2010)

Odražené paprsky mohou být zaznamenávány diskretně, takové měření ale neposkytuje žádné informace o tvaru odražené vlny. Na obrázku 1a je tímto způsobem zaznamenán několikanásobný odraz, nejprve od větví stromů, poté od větví nižších pater a nakonec od zemského povrchu. Oproti tomu senzory leteckého laserového skenování nové generace jsou

navíc schopny zaznamenat tvar celého odraženého paprsku (obr. 1b) pomocí jeho digitalizace (obr. 1c), (Beraldin, Blais, Lohr, 2010).

Tato technologie je nazývána jako „full-waveform“ (FWF). V porovnání s jednoduššími možnostmi záznamu signálu umožňuje FWF nést atributy s informacemi o struktuře a vlastnostech odražené vlny, především šířce a amplitudě každého odrazu (Briese, 2010). Amplituda odrazu popisuje sílu odražené vlny, která je závislá na mnoha faktorech, například senzoru LLS, geometrii skenování nebo charakteristice vlny odražené od konkrétních objektů na zemském povrchu (Mallet, 2009, Kashani, Olsen, Parrish, Wilson, 2015). Tyto a další doplňující informace by měly sloužit k tvorbě či zpřesnění DMR, ovšem ještě v roce 2010 Briese psal, že téměř všechny filtrační algoritmy jsou založeny pouze na geometrických kritériích a doplňující informace o odražené vlně se využívají jen vzácně, a i dnes se setkáváme s algoritmy založenými převážně na geometrických kritériích.

Výsledkem LLS jsou body o souřadnicích  $x, y, z$ , tzv. mračno bodů (*point cloud*), které prochází různými úpravami, aby z něj vznikl kvalitní DMR. Vizualizací prvního odrazu získáváme model podobný digitálnímu modelu povrchu (DMP), který zachycuje kromě zemského povrchu a veškerých objektů na něm (budovy, vegetace a další), i body odražené od nežádoucích objektů, jako jsou například automobily, zvířata na loukách nebo ve vzduchu. Často se udává, že vizualizací posledního odrazu a jeho odvozenin získáme DMR (např. Briese, 2010), protože předcházející odrazy pochází od objektů na povrchu. Ovšem jak je patrné na obrázku 2, k několikanásobnému odrazu dochází i cestou paprsku od povrchu, a proto je tato představa velmi zjednodušená.



**obr. 2: Několikanásobný odraz paprsku**  
zdroj: Hug, Ullrich, Grimm, 200-?

Tvorba DMR je časově velmi náročná. Podle Flooda (2001) zabere ruční klasifikace (filtrace) a kontrola kvality 60-80 % času celého procesu (od plánování letu po kontrolu editace), proto je nutné vytvářet algoritmy s takovými výsledky vznikajícího modelu, aby se doba tvorby zbytečně

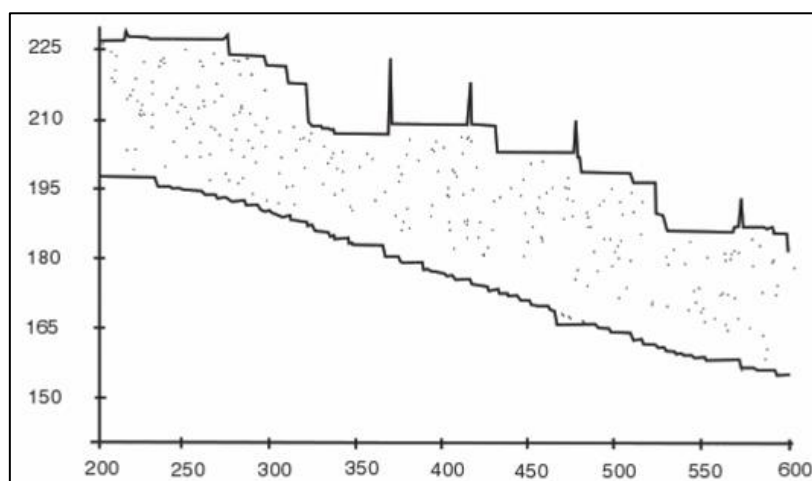
neprodlužovala právě například díky ruční klasifikaci/doklasifikaci. Filtračních algoritmů existuje velké množství, obvykle se rozdělují do pěti skupin (např. Pfeifer, Mandlbürger, 2009; Briese, 2010) – jednoduché filtry, morfologické filtry, metody založené na postupném zhušťování, surface-based filtrace a segmentačně založená filtrace. Na konci kapitoly 2 věnované popisu filtračních algoritmů je popsán poměrně nový postup, při kterém dochází ke kombinaci bodově a segmentačně řízené filtrace (Xu, Vosselman, Oude Elbering, 2014).

## 2.1 Jednoduché filtry

Jednoduché filtry pracují vždy s minimální výškou na určité ploše. Takovou plochou může být například buňka rastru, jejíž výška je převzata od bodu s nejnižší výškou právě v této buňce. Tento postup způsobuje systematické chyby, protože filtr je postaven na předpokladu rovného terénu, důsledkem tedy je, že výška nakloněného či vyvýšeného terénu je vždy podhodnocena. Velikost chyby závisí na sklonitosti/členitosti terénu a také na velikosti buňky (Pfeifer, Mandlbürger, 2009).

## 2.2 Morfologické filtry

Tato skupina algoritmů je založena na konceptu matematické morfologie. Filtry se využívají především pro rekonstrukci tvaru. Dvěma základními operátory jsou eroze a dilatace. Ty umožňují zjednodušení struktury povrchu – dilatace zvětšuje objekty v binárním obraze, eroze je naopak zmenšuje. Tyto operátory lze kombinovat a získáváme operace zavření (eroze po dilataci – ke spojení blízkých objektů, zaplnění děr) a otevření (dilatace po erozi – k odstraňování malých objektů, zjednodušení objektů).

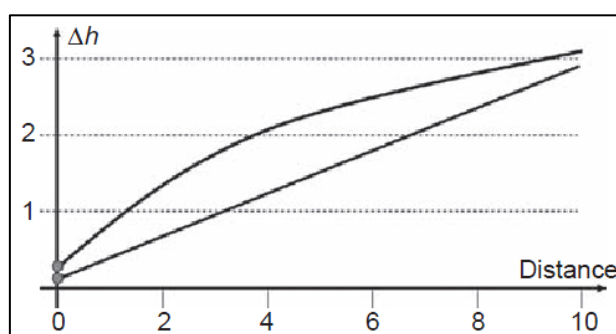


obr. 3: Výsledek morfologického filtru podle Lindenbergera  
zdroj: Lindenberger, 1993

Jedním z prvních, kdo využil morfologické filtry za účelem filtrace bodového mračka, byl Lindenberger (1993). Stejně jako při obrazových analýzách, i zde při práci s daty LLS bylo

definováno okno (tzv. strukturní element), který se po vybraném profilu bodů posouval a probíhala operace otevření nebo zavření. Na obrázku 3 jsou zakresleny body profilu a dvě linie, ta spodní představuje aproximaci DMR (vznikla operací otevření), horní aproximace DMP (vznikla operací uzavření). Výsledek je značně nepřesný a sám autor navrhl využívat pokročilejší metody tvorby digitálních modelů.

Jiným příkladem morfologického filtru je algoritmus, jehož základní myšlenkou je fakt, že výskyt velkých výškových rozdílů mezi dvěma blízkými body v terénu je nepravděpodobný. Algoritmus je založený na výpočtu maximálního výškového rozdílu jako funkci vzdálenosti mezi dvěma body (Vosselman, 2000). Každý bod je srovnáván s body v nejbližším okolí (nejčastěji kruhovém o poloměru přibližně 5 m) a je sledován výškový rozdíl. V případě, že je výškový rozdíl mezi body vyšší než zvolená hranice, je bod identifikován jako neterénní. Funkce pro výpočet sklonu (obr. 4) je obecně neklesající a může být odvozena z trénovacích ploch. Přestože autor udává, že chyba spočítaného DMR je relativně malá (je udána střední kvadratická chyba řádově 20-30 cm), problémem je stále rozlišení bodů terénu na sklonitém povrchu a nízké vegetace.



obr. 4: Příklad funkce pro výpočet sklonu  
zdroj: Pfeifer, Mandlbürger, 2009

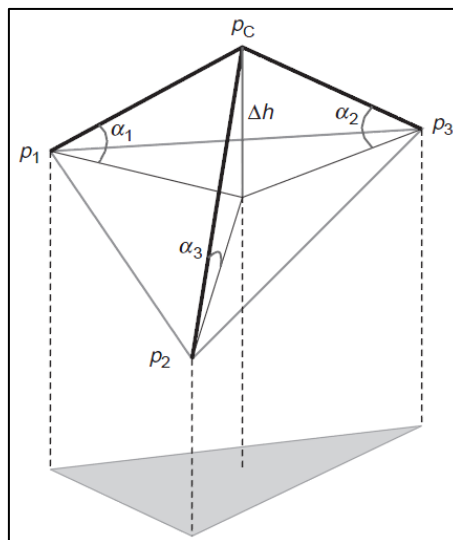
## 2.3 Filtry založené na postupném zhušťování

V anglicky psané literatuře se setkáváme s pojmem *Progressive densification* pro označení filtrů této skupiny. Algoritmy pracují na opačném principu než filtry z předcházející kapitoly. Základem všech filtrů je malé množství před-klasifikovaných bodů (definovaných jako terénní), které se postupně rozšiřuje přidáváním dalších a dalších bodů, a dochází tak k přetváření a dotváření modelovaného povrchu. Těmito filtry se zabývali například Axelsson (2000) nebo Sohn, Dowman (2002).

Axelsson (2000) představil metodu progresivního zhušťování TIN. Z dat LLS jsou vybrány nejnižší body relativně velkých buněk, a z těchto bodů je pak vytvořen TIN, který aproximuje terén. Pro každý vzniklý trojúhelník je přidán další bod, když splní dvě podmínky – bod leží od roviny trojúhelníka ve vzdálenosti menší, než je maximální možná vzdálenost, a úhel, který svírá hrana s rovinou trojúhelníka, je menší než prahová hodnota (obr. 5). Operace se provádí iterativně, po každé iteraci se podle histogramu přepočtou hraniční hodnoty pro přiřazení bodu.



Zhušťování končí tehdy, když už žádné body nesplňují zadaná kritéria nebo není dosaženo předdefinovaného prahu hustoty bodů.

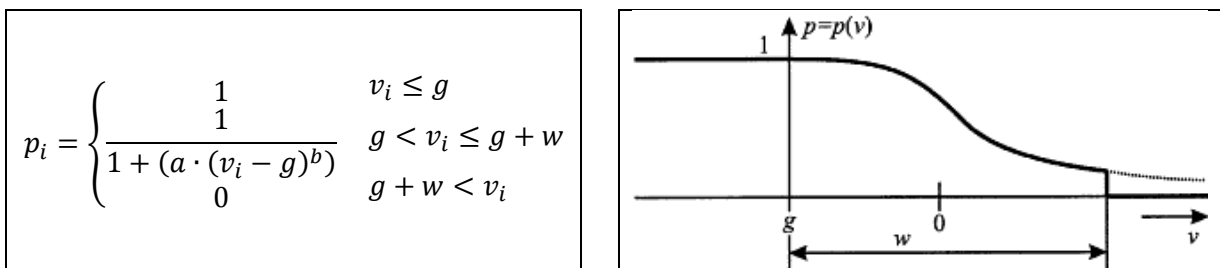


obr. 5: Zhušťování TIN podle Axelssona  
zdroj: Axelsson (2000)

## 2.4 Filtry založené na odhadu povrchu

Předpokladem filtračních algoritmů této skupiny je, že celé vstupní bodové mračno je tvořeno body terénu a iterativně se body odstraňují nebo je snižován jejich vliv na výslednou podobu modelu. V anglické literatuře se pro označení těchto algoritmů setkáváme s pojmem *surface-based filter*.

Základní filtrační metodou je robustní interpolace, která kombinuje filtraci a interpolaci (Kraus, Pfeifer, 1998). Podstatou je iterativní výpočet povrchu. Algoritmus má tři hlavní kroky. V prvním kroku vzniká interpolovaný povrch na základě vah jednotlivých bodů pomocí lineární predikce, přičemž na začátku mají všechny body stejnou váhu. Následně jsou pak pro každý bod vypočteny odchylky od přibližného průběhu terénu, tzv. rezidua. Terénní body mají záporná rezidua, kdežto body na objektech rezidua kladná nebo malá záporná. Tato rezidua slouží ve třetím kroku k výpočtu nových vah  $p$  podle funkce na obrázku 6.



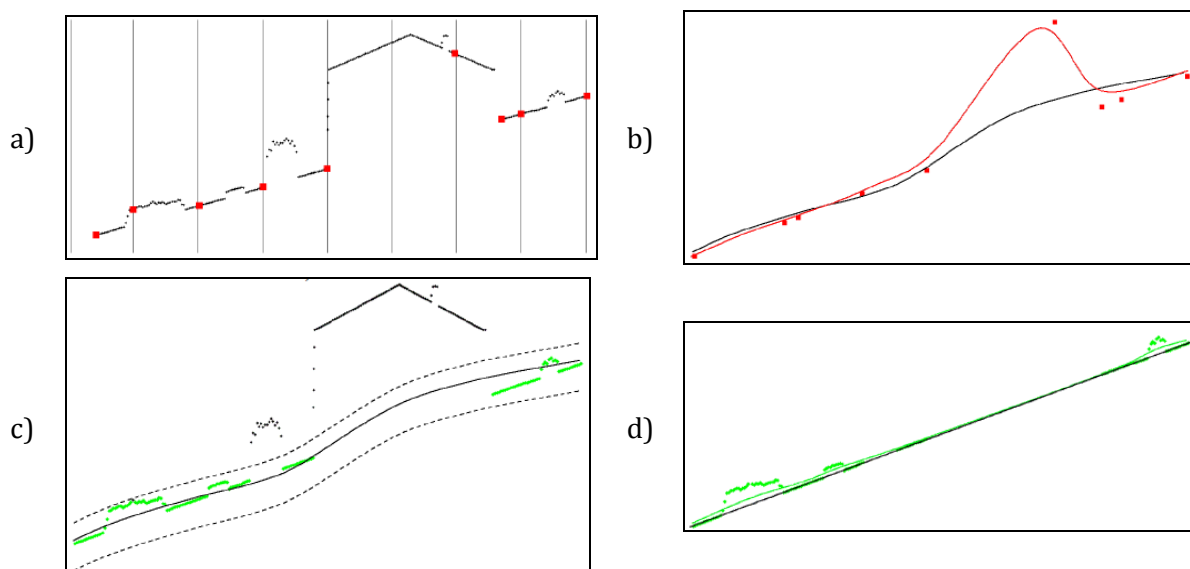
obr. 6: Robustní interpolace – váhová funkce  $p$   
a) rovnice váhové funkce, b) graf váhové funkce, zdroj: Kraus, Pfeifer, 1998

Parametry váhové funkce  $a$  a  $b$  podmiňují její strmost. Oproti standardním váhovým funkcím je posunut parametr  $g$  na ose doleva od nuly (pro data LLS je  $g$  záporné, způsobí nalezení konkrétní hodnoty je několik a vychází z histogramu reziduí). Pro  $v_i \leq g$  je váhová funkce  $p_i$  rovna jedné, tím body se zápornými rezidui (nebo přesněji body s rezidui menší než  $g$ ) získají maximální váhu ( $=1$ ), pro velká kladná rezidua (větší než  $g + w$ ) je nastavena hodnota váhy  $p_i = 0$ , pro ostatní hodnoty reziduí je váha spočítána podle vzorce uvedeném na obrázku 6a.

Kroky se opakují do té doby, dokud není dosažena stabilní situace (že jsou eliminovány všechny hrubé chyby) nebo dokud není dosažen maximální počet iterací. Výsledkem jsou body rozdělené na terénní (velká váha) a neterénní (malá váha). Dochází zde i k filtraci, bod je odstraněn v případě, že jeho vzdálenost od terénu převyšuje definovanou mez váhové funkce.

### 2.4.1 Hierarchická robustní interpolace

Takto popsaná robustní interpolace však nedokáže eliminovat hrubé chyby, příkladem mohou být body, které zachycují střechu rozlehlé budovy. Problém je vyřešen hierarchickým přístupem, který je založen na podobném principu jako využití obrazových pyramid při zpracování obrazu. Metodu pak nazýváme hierarchickou robustní interpolací (Pfeifer, Stadler, Briesse, 2001).



**obr. 7: Kroky hierarchické robustní interpolace**

a, b, c) popis v textu, d) DMR odvozený na nejjemnější úrovni, zobrazena první a poslední iterace, zdroj: Briesse, Pfeifer, Dorninger (2002)

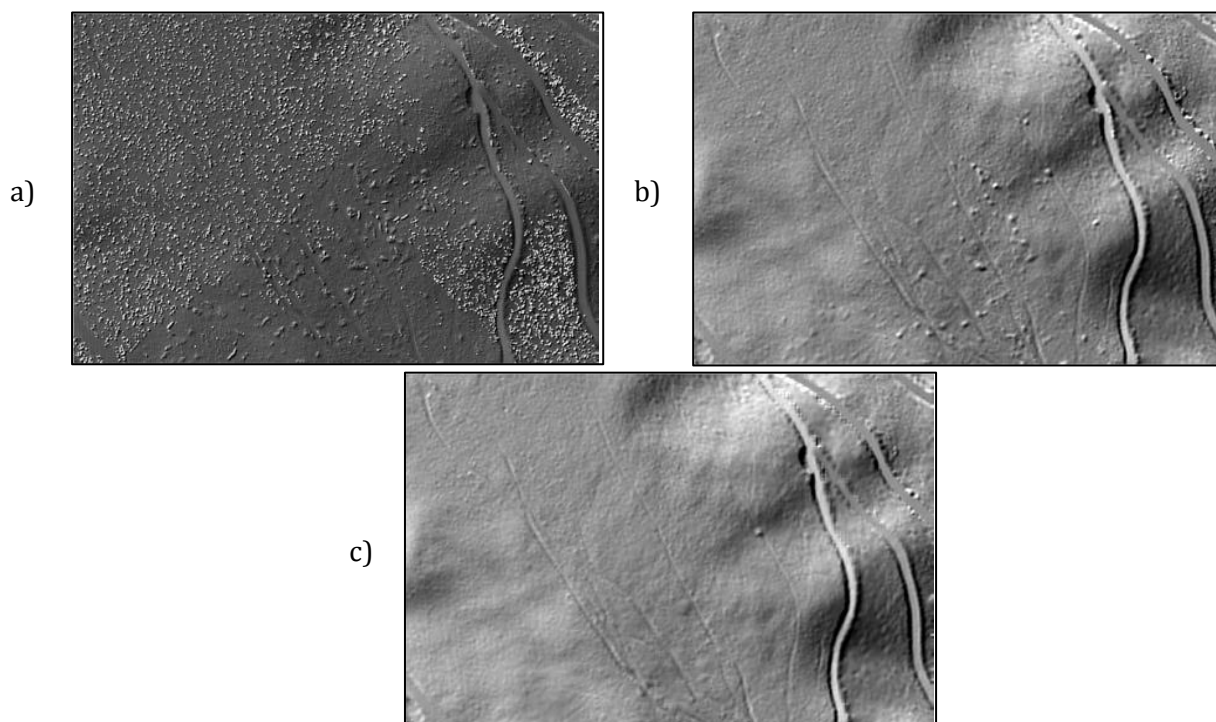
Ta má opět tři základní kroky. V prvním jsou vytvořeny datové pyramidy (nejnižší bod v pravidelném intervalu, obr. 7a), v druhém je použita k vytvoření DMR robustní interpolace (obr. 7b, zobrazena první a poslední iterace) a v posledním je srovnán DMR s daty lepšího rozlišení a jsou vybrány body, které leží v tolerančním pásu (obr. 7c). Kroky dva a tři se opakují pro každou úroveň.

V případě, že jsou k dispozici data s doplňkovými informacemi o průběhu odražené vlny, využívají se při jejich filtraci doplňkové ne-geometrické informace. Tyto informace se používají

k odvození váhových funkcí, pomocí kterých pak dochází k rozlišení terénních a neterénních bodů.

Klasifikace bodového mračka na body terénní a neterénní pouze na základě geometrických vztahů mezi sousedními body nepodává vždy dostatečně přesné výsledky, a to především v oblastech s nízkou vegetací. Potenciál full-waveform informace z LLS zjišťovali ve spojení s archeologickým projektem autoři Doneus, Briese (2006). K nalezení malých archeologických struktur v zalesněném území byla využita šířka odrazu a amplituda. Tyto prvky mikroreliéfu mají 0,5-1 m a oproti velkým útvarům jsou těžko identifikovatelné, protože se v bodovém mračnu jeví podobně jako nízké křoviny nebo hromady větví či dřeva. Stěžejní je proto najít a eliminovat i nejnižší vegetaci, ale zároveň zachovat co nejvíce informací o terénu (čili neeliminovat body, které tvoří terén), což vytváří velké požadavky na vylepšení filtračních parametrů v použité robustní interpolaci. Výhodou bylo, že se v oblasti nevyskytovaly budovy, čili došlo ke zjednodušení, protože nemusela proběhnout jejich prvotní filtrace.

V prvním kroku byla provedena Gaussova dekompozice FWF dat, na jejímž základě byly odvozeny 3D souřadnice všech odrazů s doplňkovými informacemi (šířka odrazu a amplituda). Pro další zpracování dat byly vybrány pouze body posledního odrazu se svými atributy. Použita byla hierarchická robustní interpolace, která je implementována v programu SCOP++ a její princip je vysvětlen výše.



**obr. 8: Tvorba DMR podle autorů Doneus, Briese**

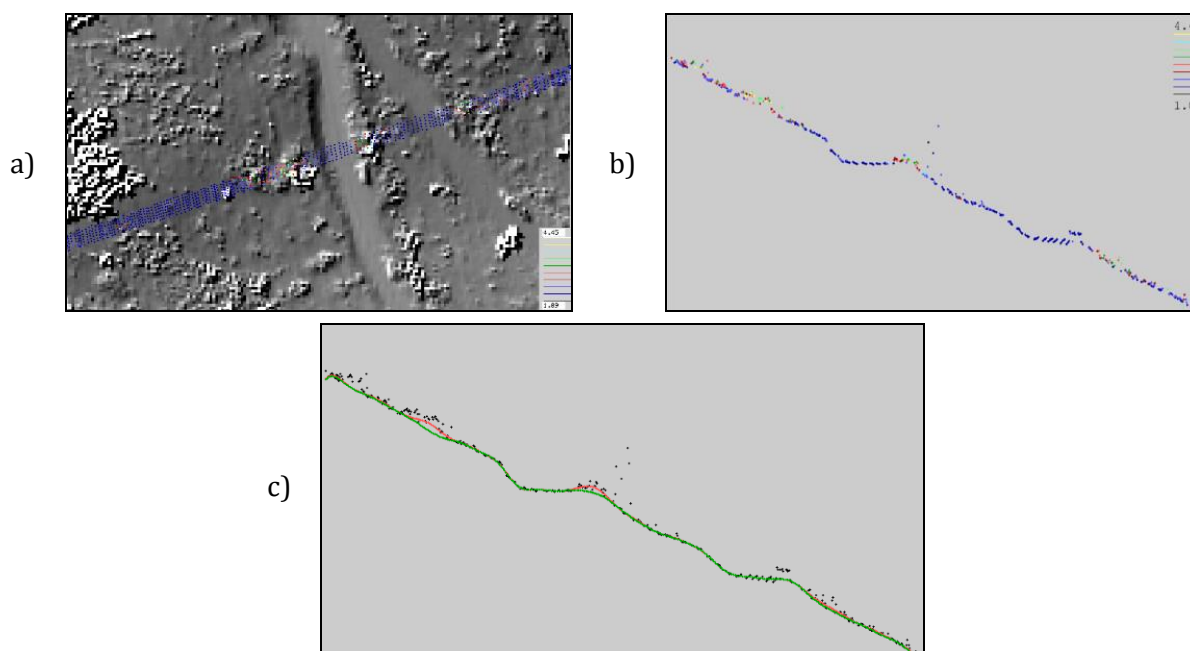
a) DMR ze všech bodů posledního odrazu, b) DMR po první iteraci, c) výsledný stínovaný DMR po odstranění bodů s velkou šířkou odraženého signálu, zdroj: Doneus, Briese (2006)

Konkrétně byla pro první pyramidovou úroveň vybrána hustota bodů 1 bod/m<sup>2</sup> (oproti skutečným asi 8 bodům/m<sup>2</sup>), na ní byla použita robustní interpolace s váhovou funkcí

pro filtraci bodů, poté byl přepočten krok s ohledem na metrový terénní model, který odstraní body posledního odrazu 0,5 m nad povrchem a nakonec byla na zbývající data druhé úrovně opět aplikována robustní interpolace. Tento proces byl použit dvakrát – jednou pro všechny body posledního odrazu, podruhé byl aplikován na výběr bodů posledního odrazu podle prahové hodnoty šířky odrazu. Tímto způsobem byly odstraněny křoviny nebo hromady větví, protože jejich odpovídající odražená vlna má větší šířku, tyto body tak nebyly zahrnuty do datasetu, ze kterého se DMR vytváří. Prvky mikoreliéfu v datech zůstávají, protože mají menší šířku odraženého signálu. Postupná tvorba DMR je zachycena na obrázku 8.

Využití prahové hodnoty šířky odrazu v procesu prvotní filtrace znamenalo pro výsledný DMR značné zlepšení, nicméně pouhé prahování v procesu filtrace nemusí vždy k uspokojivému výsledku stačit. Mandlbürger, Briese, Pfeifer (2007) rozšířili hierarchickou robustní filtraci zavedením individuálních vah pro bodové mračno. Využití apriorních vah dovoluje kombinovat rozšiřující informace o odrazu s geometrickými kritérii. Tyto váhy jsou vybrány tak, aby byly závislé na šířce odražené vlny. Předpokládá se, že menší šířku vykazují body ležící na terénu, a je jim tudíž dána větší váha, kdežto body s větší šířkou jsou odražené od vegetace a jejich váha klesá.

Na obrázku 9a je zachycen stínovaný model a vybrané body posledního odrazu daného profilu. Tyto body jsou obarveny podle šířky odrazu, a je tedy patrné, že šířka odrazu je větší v oblasti nízké vegetace. DMR vzniklý bez využití individuálních vah je v těchto místech o něco vyšší než terén ve skutečnosti (obr. 9c). Použití individuálních vah závislých na šířce odrazu vede k reálnějšímu DMR, který je díky vahám nízkou vegetací ovlivněn méně.



obr. 9: Tvorba DMR podle autorů Mandlbürger, Briese, Pfeifer

a) stínovaný DMR a body profilu, b) profil – body obarveny podle šířky odrazu, c) profil – černé body: body posledního odrazu, červená linie: DMR bez využití individuálních vah, zelená linie: vylepšený DMR o využití individuálních vah, zdroj: Mandlbürger, Briese, Pfeifer (2007)

## 2.5 Segmentačně založená filtrace

Filtrace bodového mračka nemusí nutně probíhat tak, že se srovnávají charakteristiky jednoho bodu s jedním či více okolními body, pro odvození modelu může být použit shluk bodů, čehož využívají segmentačně řízené filtry (Mücke, 2008). Shluk je skupina bodů definovaná pomocí kritérií homogenity, tzv. charakteristikami podobnosti, které udávají, jaké vlastnosti musí splňovat body, aby vytvořily cluster. Proces vzniku shluků se nazývá segmentace, v anglické literatuře lze najít i pojem clustering.

Při experimentálním srovnávání různých filtračních algoritmů (Sithole, Vosselman, 2004) bylo zjištěno, že právě ty metody, které pracují s povrchem jako celkem, se jeví jako lepší než ty, které porovnávají výšky pouze dvou bodů, popřípadě bodu s body. Nicméně autoři konstatovali, že po celou dobu testování bylo zřejmé, že neexistuje jeden „nejlepší“ algoritmus, ale že může být pouze více či méně vhodný pro daný typ krajiny. Dále bylo doporučeno různé metody kombinovat, popřípadě obohatit algoritmus alespoň o jeden další ne-geometrický parametr, kterým může být například intenzita nebo šířka odražené vlny.

V následujících podkapitolách budou představeny vybrané segmentační algoritmy. Existují dvě základní skupiny – *scan line segmentation* a *seeded region growing*, v závěru kapitoly je pak představena metoda neřízený přístup – *clustering*.

### 2.5.1 Scan line segmentation

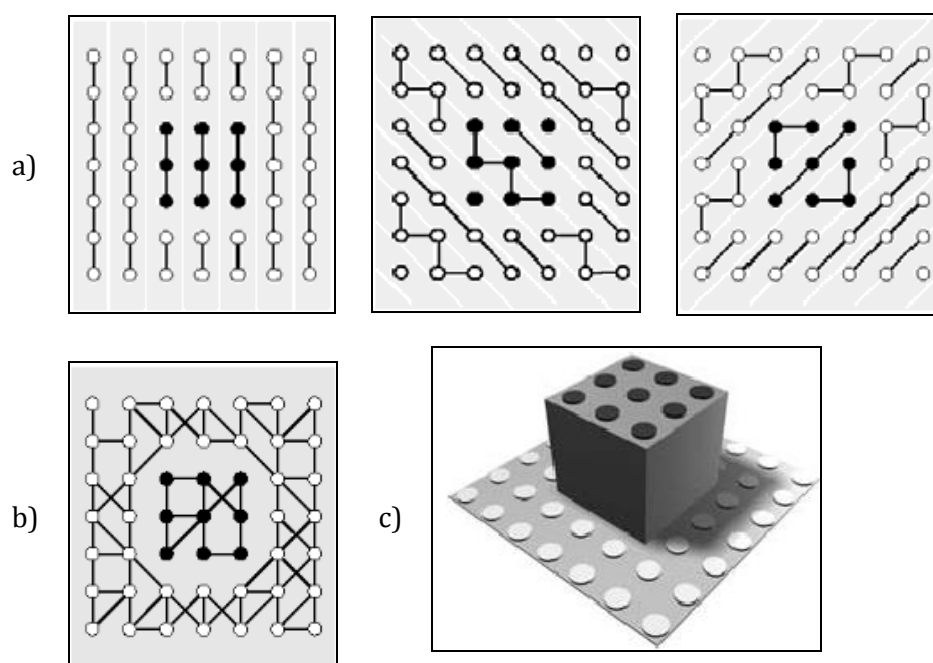
Metodu *scan line segmentation* popsali a použili poprvé na rastrových obrazových datech Jiang a Bunke v roce 1994 (in Sithole, Vosselmann 2005). Principem metody je vytvoření segmentů pro každou linii zvlášť (ve směru řádků, sloupců, uhlopříčně, ...), výsledné segmenty jsou pak vytvořeny seskupením dílčích segmentů po překřížení primárních směrů.

Modifikaci této metody aplikovali na data LLS Sithole, Vosselmann (2005). Bodové mračno rozdělili na pásy, kdy každý pás představuje jeden profil. Pro tento profil je generováno vážené minimum bodů, které tvoří kostru, z tohoto minima jsou odstraněny takové body, které mají váhu větší než je definovaný práh. Ve výpočtu vah vystupuje parametr  $k$ , který představuje měřítko blízkosti

$$w = (x_j - x_i)^2 + k(z_j - z_i)^2,$$

kde  $x_i, z_i$  jsou souřadnice koncových bodů a  $x_j, z_j$  souřadnice hrany. Parametr může nabývat hodnot větších než 1, tudíž body podél osy  $x$  jsou blíží než body podél osy  $z$ .

Segmentace mračka je dosažena překrytím všech profilových linií (obr. 10b), přičemž dva sousední paralelní profilové segmenty jsou spojeny jen tehdy, když existuje profilový segment s jinou orientací, který zahrnuje body obou těchto paralelních segmentů. Taková souslednost segmentů je pak využita ke klasifikaci.



**obr. 10: Schéma metody scan line segmentation**

a) bodové mračno rozdělené do profilových linií v různých směrech, b) překrytí základních profilových směrů, c) model krajiny, zdroj: Sithole, Vosselmann (2005)

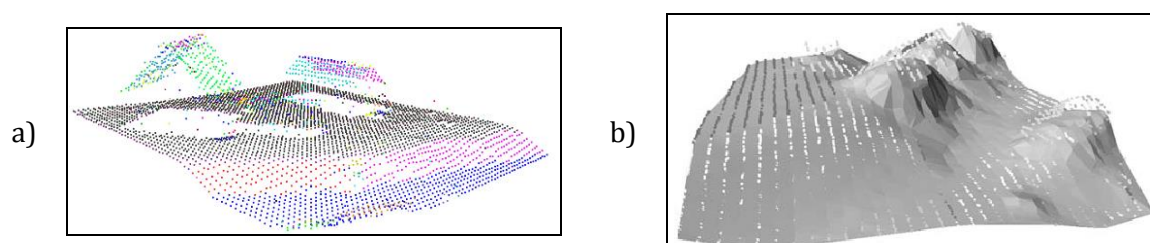
V segmentovaných datech může nastat alespoň šest různých topologických vztahů/tvarů, kde dva z nich – *raised* a *high* – tvoří objekty na povrchu, *lowered* a *low* jsou zase spojovány s holým povrchem a *terraced* může být jak terén, tak objekt na něm, poslední možností je *no shape*. Model povrchu se tvoří iterativně – nejprve proběhne segmentace tak, jak byla popsána výše, poté jsou vygenerované segmenty klasifikovány na terénní a neterénní (*raised* a *high*) a všechny neterénní body jsou z modelu odstraněny. V další iteraci probíhá segmentace s vyšší hodnotou parametru  $k$ , segmenty jsou pak opět klasifikovány. Tento proces probíhá do té doby, dokud není dosažen uživatelem definovaný práh – maximální hodnota parametru  $k$ .

Touto metodou lze detekovat mosty a záleží jen na uživateli, jestli si určí, zda budou z DMR odstraněny nebo ne. Algoritmus je vhodný pro rychlou klasifikaci, výhodou také je, že jsou eliminovány i velké budovy, které různými filtračními metodami odstraňovány nejsou, naopak problémem je stále detekce vegetace ve sklonitém terénu, proto je potřeba, aby uživatel měl znalosti o terénu a zvolil vhodné nastavení jednotlivých parametrů.

## 2.5.2 Seeded region growing

Metodou *seeded region growing* jsou klasifikovány body tak, že se testuje, zda z bodů o dané výšce v určité vzdálenosti lze vytvořit spojitý/hladký povrch. Jádrové plošky jsou pak rozšiřovány o sousední body, které mají maximální definovanou vzdálenost měřenou kolmo k povrchu, přičemž segment se rozrůstá do té doby, dokud nějaké body splňují zadané podmínky, jako například kolmá vzdálenost. Často jsou povrchy, které jsou tvořeny jen malým počtem bodů, eliminovány.

Tóvári, Pfeifer (2005) navrhli kombinaci metody segmentace a robustní filtrace, ve které využívají výhod obou těchto metod. V prvním kroku je aplikován algoritmus *seeded region growing*, čili je náhodně vybráno  $n$  sousedících bodů, které jsou použity k odhadu nastavení roviny a normálového vektoru pro každý bod. Body z  $n$  nejbližších sousedů jsou spojeny do segmentu, když splní tři kritéria (tři různé prahy), kterými je podobnost normálového vektoru, vzdálenost od sledovaného bodu  $d$ , vzdálenost mezi body a sledovaným bodem  $d$ . Růst segmentu je zastaven, když žádný další bod nespĺňuje kritérium proto, aby se stal bodem segmentu. Segmentované bodové mračno je na obrázku 11a.



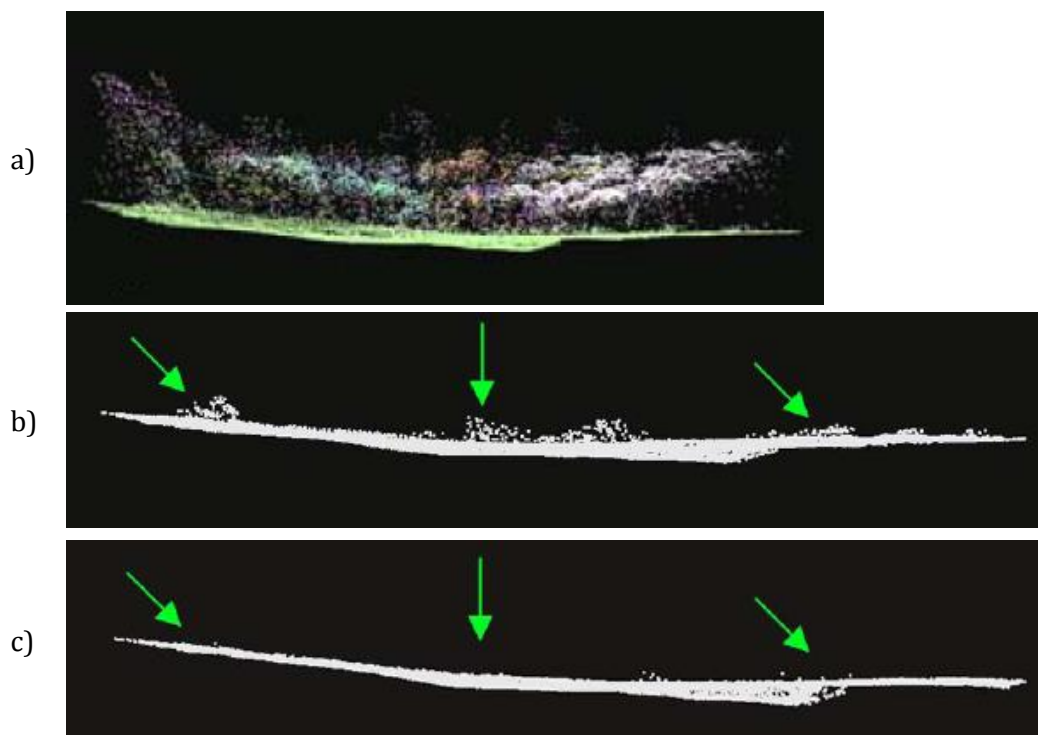
**obr. 11: Dílčí výstupy segmentačně založené robustní interpolace**

a) bodové mračno rozdělené do segmentů, b) povrch po první iteraci robustní interpolace, zdroj: Tóvári, Pfeifer (2005)

V druhém kroku je použita robustní interpolace pro skupiny (shluky) bodů (obr. 11b). Proces pracuje iterativně v několika krocích - každý segment začíná s váhou 1 a povrch je tak interpolován s ohledem na rovnost vah, poté je počítán rozdíl každého bodu k interpolovanému povrchu, ve třetím kroku se vezme průměr všech hodnot jednoho segmentu a váhovou funkcí se definují nové váhy pro celý segment, v posledním kroku se algoritmus vrátí k prvnímu kroku, nebo se iterace zastaví a segmenty jsou klasifikovány na terénní a neterénní podle současné váhy. Váhová funkce je definována tak, že segment s *filter value* nižší než 0 (tedy leží pod povrchem) bude mít nejvyšší váhu. Takové body mají větší vliv na vznikající povrch než body s *filter value* větší než 0, které tak nemají téměř vliv. Iterace jsou zastaveny, když mají všechny segmenty rozdíl menší nebo větší než určitý předdefinovaný práh. To znamená, že každý segment je klasifikován na terénní (nízký pozitivní rozdíl) a neterénní (vysoký pozitivní rozdíl).

Studii autorů Tóvári, Pfeifer (2005) rozšiřuje Mücke (2008) o využití doplňkových FWF informací při procesu segmentace, kterými jsou šířka odrazu a backscatter cross section (charakteristika, která vyjadřuje podíl intenzity rozptýleného záření k intenzitě ozařování (udává se v  $m^2$ )). Autor ve své práci nejdříve zjišťuje, zda jsou FWF informace užitečné při tvorbě DMR z dat LLS, a tvrdí, že pomocí těchto dat nelze rozdělit body do žádoucích tříd, ale že mohou být použita k odvození pravděpodobností, zda bod spíše reprezentuje terén nebo ne. Data s FWF informací testoval na dvou různých přístupech – kromě segmentačně řízené filtrace i na *point-based* filtraci. Autor konstatuje, že metoda, která využívá segmentačně řízené filtrace, dosahuje lepších výsledků nežli *point-based* filtrace, přičemž největší rozdíly ve výsledcích jsou patrné ve sklonitých oblastech a v územích, která jsou hustě pokryta vegetací.





**obr. 12: Segmentačně řízená filtrace bodového mračna podle Mückeho**

a) segmentované bodové mračno - body představující povrch zeleně, b) 40% odchylka šířky odrazu a backscatter cross section, c) 10% odchylka šířky odrazu, zdroj: Mücke (2008)

Mückeho segmentační algoritmus byl také založen na principu *seeded region growing*, Bod je přiřazen do segmentu, když splňuje několik autorem definovaných podmínek – první je, že bod musí ležet v maximální vzdálenosti od současného jádra testované oblasti, dále nesmí přesahovat určitý limit ve směrodatné odchylce, která je srovnávána se startovními body, vstupním parametrem je i výšková odchylka bodu od současného jádrového bodu a poslední podmínkou je 40% odchylka šířky odrazu a backscatter cross section. Není vytvořena žádná podmínka na minimální počet bodů ve shluku, cílem je totiž pracovat se všemi dostupnými body.

Bylo vyzkoušeno šest různých kombinací vstupních parametrů. Výsledky se různí počtem vzniklých segmentů, jejich velikostí i klasifikováním na terénní a neterénní. Na terénní segmenty byly klasifikovány ty s největším počtem bodů, protože se předpokládá, že terén je mnohem hladší a homogennější než lesnatá plocha či jiná vegetace.

Výsledek segmentace je zobrazen na obrázku 12 a je patrné, že v relativně rovinatém území byla vegetace od povrchu oddělena. Menší segmenty, které jsou obklopené většími a mají mírně se lišící charakteristiky, jsou klasifikovány jako neterénní, autor udává doporučení ke zlepšení výsledku, a to, že by bylo vhodné navíc analyzovat výškové rozdíly mezi hraničními polygony. Druhou možnou modifikací segmentačního algoritmu může být srovnávání kandidátního bodu s průměrnými hodnotami aktuálního segmentu, nejen se startovním bodem.



### 2.5.3 Clustering

Filin (2002) navrhl jinou metodu tvorby homogenních shluků bodového mračka. Jeho metoda clusterování je složena ze dvou procesů – nejprve se identifikují vzory v datech na základě atributů a poté se data seskupí do clusterů.

V první fázi dochází k rozdělení bodového mračka do čtyř kategorií – zalesněné území, území s nízkou vegetací a členitý terén, pozvolna se měnící terén, rovné povrchy. Rovné povrchy jsou vyčleněny do samostatné kategorie z důvodu další možné aplikace, protože se většinou jedná o objekty vytvořené člověkem. Proces rozdělení do čtyř kategorií probíhá neřízenou klasifikací a je založen na vektoru atributů. Podoba vektoru je

$$v_i = \{x_i, y_i, z_i, \vec{n}_{\{1,2\}_i}, \rho_i, d_i\},$$

kde  $x_i, y_i, z_i$  jsou souřadnice bodu,  $\vec{n}_{\{1,2\}_i}, \rho_i$  jsou parametry povrchu (parametry normály  $\vec{n}_{\{1,2\}_i}$  představují úhly  $\varphi, \theta$ , konstanta  $\rho$  je vzdálenost od počátku k rovině) a  $d_i$  je relativní výškový rozdíl bodu a jeho okolí. Proces začíná nastavením minimálního počtu bodů ve shluku a prahu přesnosti, následně jsou vypočítány atributy  $d_i, \vec{n}_{\{1,2\}_i}, \rho_i$  a poté je vygenerován příznakový prostor. Očekávané charakteristiky pro jednotlivé kategorie jsou uvedeny v tabulce 1.

Kategorie	Sklon povrchu	Výškový rozdíl
vysoká vegetace	rychle se měnící	velký
nízká vegetace	rychle se měnící	střední
hladký povrch	lokálně konstantní	malý
rovný povrch	stálý	malý

**tab. 1: Kategorie povrchu a jejich vlastnosti**  
zdroj: Filin (2002)

Clustery jsou vytvořeny extrahováním z tříd povrchu. K tomu je použit vyhledávací algoritmus, který na rozdíl od jiných algoritmů neřízené klasifikace nemá předem definovaný počet clusterů. Velikost segmentů je kontrolována prahováním – na počátku je nastavena hodnota směrodatné odchylky. V případě rozsáhlých clusterů se ještě ověřuje, zda je cluster homogenní a zda je tvořen body pouze jedné třídy povrchu. V posledním kroku se clustery rozšiřují o body, které nebyly dříve určeny, a dále dochází ke shluku clusterů, které jsou součástí stejného povrchu. V procesu spojování clusterů je zahrnuto i testování modelu povrchu. Příkladem mohou být dva rovinné clustery, u kterých se testuje, zda je možné je spojit dohromady. V případě, že to možné není, testuje se, zda jsou součástí jednoho hladkého povrchu.

Výhodou takového clusterování na rozdíl od metody seeded region growing je to, že není na začátku třeba vybírat jádrové body. Oproti metodě seeded region growing přináší clusterování rovněž lepší výsledky v zalesněných oblastech a dobře vyhledává shluky rovinných útvarů (např. střechy). Metoda je vhodná v případech, že nasnímaný terén dostatečně dobře neznáme.

## 2.6 Multiple-entity based klasifikace

V procesu klasifikace dat LLS se ve většině případů soustředí pozornost na výběr vhodných atributů, na jejichž základě jsou body rozděleny do předem definovaných tříd, spíše než na definování entit (Xu, Vosselman, Oude Elbering, 2014). Proto autoři Xu, Vosselman, Oude Elbering (2014) navrhli metodu založenou i na definování více entit. Touto metodou prokázali svou hypotézu, že při stejném definování atributů a klasifikátorů bude přesnost klasifikace využívající více entit vyšší.

Navržená metoda rozděluje bodové mračno do sedmi tříd – země, voda, vegetace, střechy, zdi, prvky na střeše a nedefinované objekty, a pracuje se třemi entitami – body, rovinné segmenty a segmenty odvozené metodou mean shift. Entita body představuje lokální charakteristiky objektů a je citlivá k šumu. Rovinné segmenty jsou získány pomocí surface-growing segmentace o autorů Vosselman, Gorte, Sithole, Rabbani (2004) a každému bodu segmentu je přiřazena stejná hodnota. Stejně platí i při vzniku segmentů metodou mean shift podle autorů Comaniciu, Meer (2002).

Klasifikace se skládá ze čtyř fází. Nejprve jsou data přefiltrována na terénní a neterénní, poté je na neterénní body aplikován algoritmus na získání rovinných segmentů představující zemi, vodu, vegetaci, střechy a nedefinované objekty. Následně jsou tyto výsledky využity jako kontext k bodovému rozšíření klasifikace všech tříd kromě střech na zdi a prvky střechy. V tomto kroku ale vznikají chyby, kdy je vegetace klasifikována na prvky střech v případě, kdy vegetace pokrývá střechu, proto jsou nakonec tyto chyby přesegmentovány pomocí metody mean shift a znovu překlasifikovány (oddělena vegetace od prvků střech). Atributy použité k výpočtu těchto tří entit jsou shrnuty v tabulce 2.

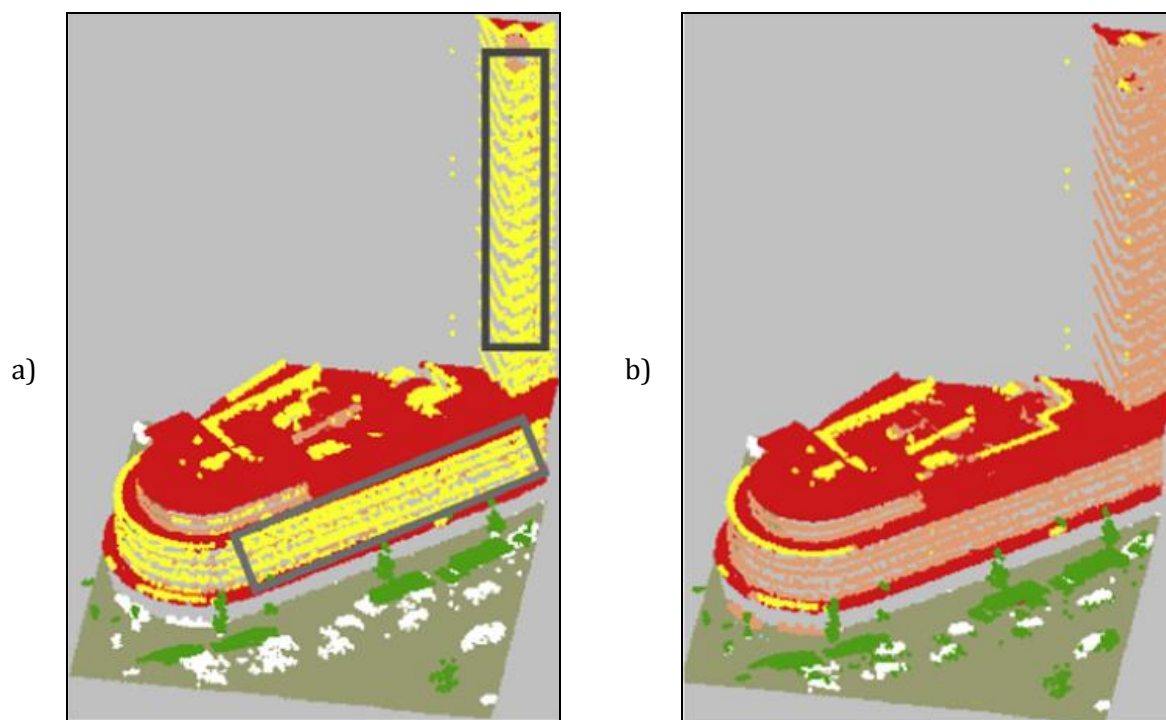
entita	body	rovinný segment	segment získaný metodou mean shift
atributy	výškový rozptyl	velikost segmentu	koeficient průměrné vzdálenosti posunu
	koeficient vzdálenosti	maximální výška k DMR	velikost segmentu
	lokální PFR*	průměrná vzdálenost bodů	průměrný výškový rozptyl
		procento bodů s několikanásobným odrazem mezi vegetací a prvky střechy	normála roviny
		PFR*	
		normála	

tab. 2: Atributy použité při výpočtu entit

\* PFR (plane fitting residual) představuje nerovnost roviny, kterou bod s body v okolí tvoří, zdroj: Xu, Vosselman, Oude Elbering (2014)

Tří entit se využívá proto, že pouze jednou z nich nelze dostatečně dobře popsat různé komplikované objekty, ať už je to dáno například v případě budov rozdílnými charakteristikami pro různé druhy zdí, nebo různou hustotou bodů způsobenou skenovacím úhlem. Na obrázku 13a je ukázka klasifikovaného bodového mračna, kdy bylo využito kontextové informace, že zdi

jsou vždy blízko a pod střechou a prvky střechy jsou vždy v blízkosti a ve vyšších polohách než střecha. Každý bod se tedy porovnává s nejbližším bodem představující střechu (planimetrická 2D vzdálenost do 1 m). Pro složitější budovy (na obrázku vysoká budova spojená s nižší) je pak klasifikace chybná, protože vysoké stěny jsou klasifikovány jako prvky střechy, protože spodní střecha je blíže než horní. Z toho důvodu se tedy vyhledávají nejbližší body vyšší střechy (obr. 13b).



**obr. 13: Klasifikace bodového mračka podle Vosselmana, a kol.**  
a) chybná klasifikace, b) správná klasifikace, zdroj: Xu, Vosselman, Oude Elbering (2014)

## 2.7 Problémy filtrace dat LLS ve skalních oblastech

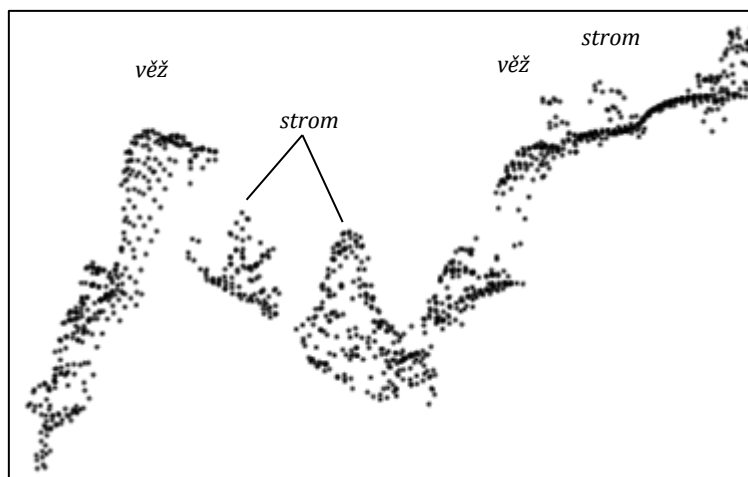
Praktická část této práce je zaměřena na práci s daty LLS v členitém terénu, konkrétně na území pískovcových skalních měst, proto jsou zde krátce popsána hlavní specifika a omezení, se kterými je třeba při zpracování dat počítat.



**obr. 14: Ukázka typické krajiny terénu skalního města**  
nahore: České Švýcarsko, dole: Prachovské skály, zdroj: archiv autorky, treking.cz

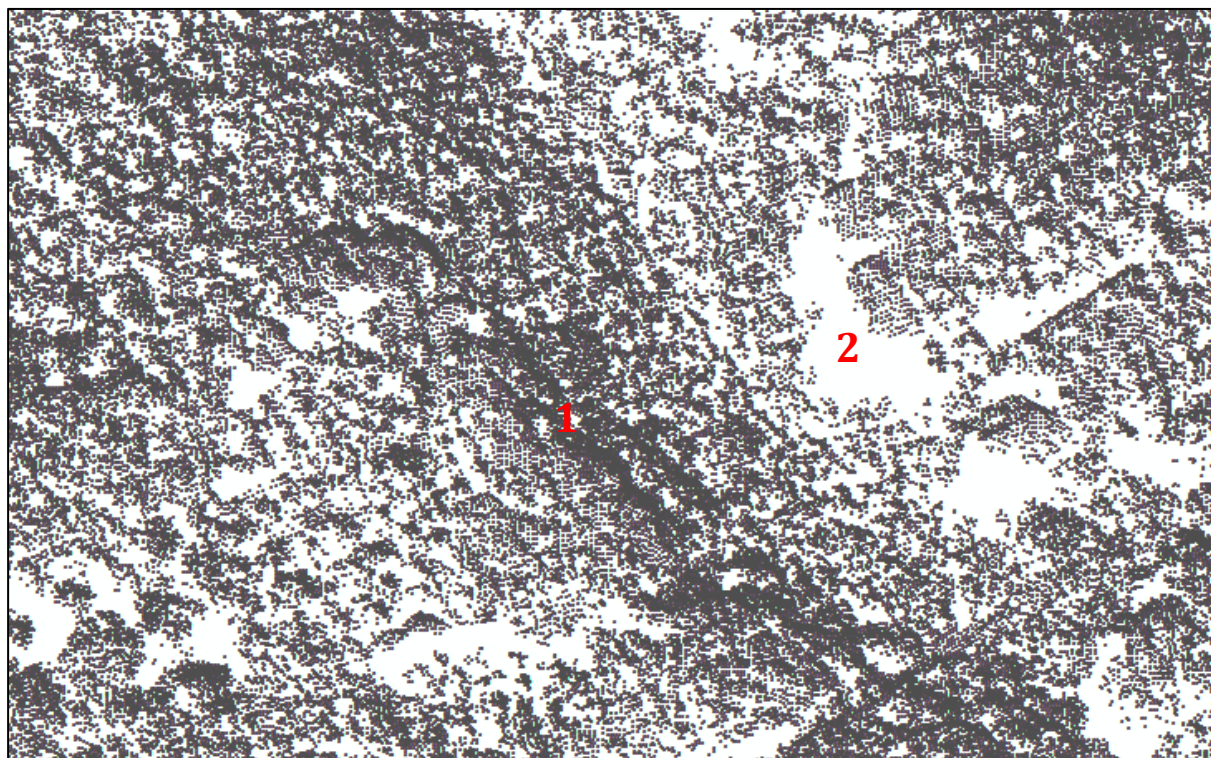
Nedostatečně kvalitní výsledky DMR v pískovcových skalních městech jsou způsobeny dvěma problémy. První příčinou jsou samotná data. Charakter skalnatého území je poměrně složitý (viz obr. 14), což způsobuje problémy už při pořizování dat leteckého laserového skenování. Charakteristická pro skalní města na území Česka je přítomnost husté vegetace, která komplikuje průchod laserového paprsku k terénu. Prostorové rozlišení bodů vegetace se příliš neliší od skalních věží (obr. 15), (Csaplovics, Kautz, a kol., 2001), proto je v takto členitém terénu složité rozlišit i pomocí poměrně sofistikovaných algoritmů, který bod představuje odraz od vegetace a který od skalní věže, obzvláště v případech, kdy jsou skalní věže nižší než nejvyšší stromová patra. Navíc odrazů od objektů terénu je málo a je obtížné z nich odvodit přesný průběh reliéfu. Situaci ještě znesnadňuje fakt, že vegetace je většinou jehličnatá, a proto ani nepomůže provést skenování mimo vegetační období.





**obr. 15: Profil daty LLS vedený v okolí Pravčické brány**  
zdroj: ZÚ; vlastní tvorba

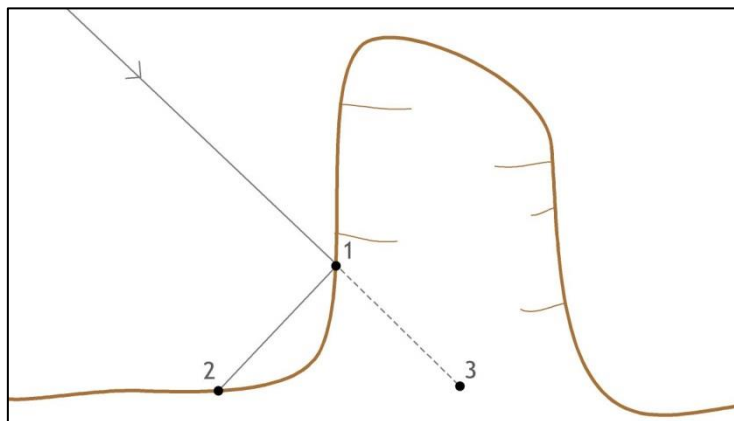
Jiným problémem, se kterým je třeba se při zpracování dat vypořádat, je nerovnoměrná hustota bodů vzniklá v důsledku vzájemné polohy vysokých skal a skeneru (myšleno při kolmém průmětu bodů do roviny). Na přivrácených stranách skalních stěn ve směru skenování dochází ke zhuštění, naopak ve stínu za nimi je bodů málo, nebo dokonce žádné. Taková situace je zachycena i na obrázku 16.



**obr. 16: Ukázka nerovnoměrné hustoty bodů v členitém terénu**  
1 – zhuštění bodů v oblasti skalních stěn, 2 – stín, zdroj: ZÚ, vlastní tvorba

Při pořizování dat LLS dochází ještě k jevu zvanému multipath efekt (obr. 17). Jev je zapříčiněn několikanásobným odrazem od okolních objektů, díky čemuž se prodlouží doba, za

kterou se paprsek vrátí, a skener proto vyhodnotí polohu bodu chybně (Petrie, Toth, 2009, Sanz Subirana, a kol., 2011). K vícenásobnému odrazu nedochází jen ve skalních oblastech, ale typicky i ve městech nebo při odrazech od vegetace. Chybu lze minimalizovat například pomocí speciálních programů, designem antény (přijímače) nebo kombinací obojího (Seepersad, 2014).



obr. 17: Multipath efekt

1 – místo prvního odrazu, 2 – skutečná poloha druhého odrazu, 3 – poloha druhého odrazu zaznamenaná skenerem, zdroj: vlastní tvorba

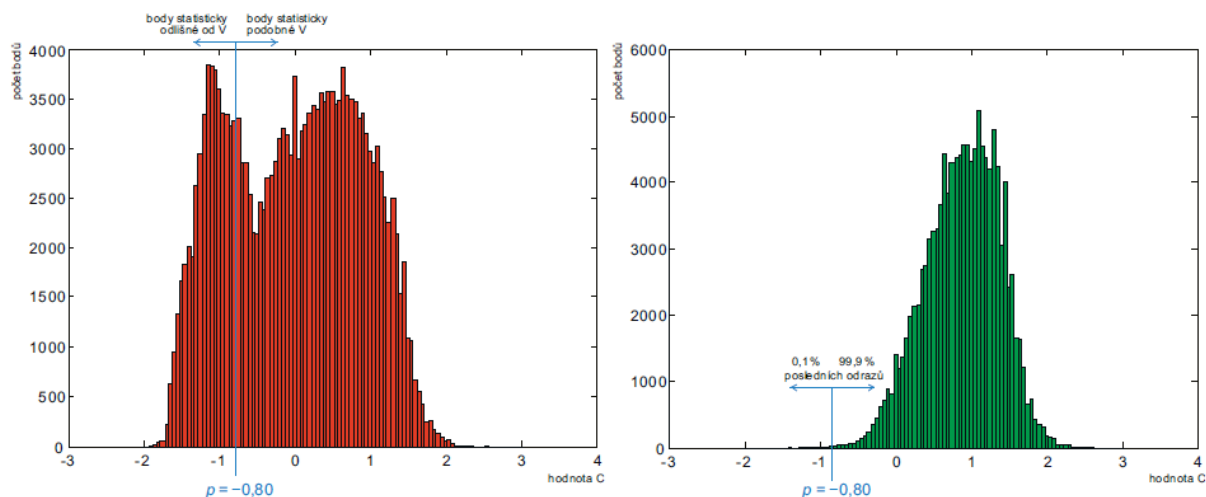
Druhou příčinou špatných výsledků DMR je princip filtračních algoritmů. Podstatou většiny dnes běžně používaných filtračních algoritmů dat LLS je tvorba spojitého povrchu na základě geometrie, ovšem předpokladu pozvolna se měnícího povrchu bez výrazných změn oblastí skalních měst neodpovídají. V takových místech proto dochází k úplnému odfiltrování skal nebo vyhlazení jejich skutečného průběhu. Zde můžeme pozorovat analogii skalního města s městem ve smyslu zástavby, kdy skalní věže odpovídají budovám a hluboké soutěsky s kolmými stěnami zase uličkám obklopeným vysokými domy (Lysák, 2011). V případě městské zástavby (a dalších oblastí, kde se projevuje lidská činnost) je často využívána segmentace, která pomůže nežádané objekty z výsledného modelu odstranit, a tím výsledek filtrace podstatně zlepšit. V případě skalního města je ovšem cílem tyto útvary ponechat součástí modelu, navíc je třeba k segmentaci využít i FWF informace, protože členitý terén i kvůli husté vegetaci nelze odvodit pouze na základě geometrie (tj. souřadnic  $x, y, z$ ).

Problematickou tvorbou DMR z dat leteckého laserového skenování s využitím full-waveform informace v oblasti pískovcového skalních měst se zabýval Lysák (2011). Navrhl metodiku, díky které je bodové mračno rozděleno na body terénu a body vegetace (ve vybraném zájmovém území se nevyskytovaly žádné budovy). Rozdělení probíhá podle charakteristiky  $C$  vypočtené jako

$$C = \log\left(\frac{width}{amplitude}\right),$$

přičemž výpočet se provádí pouze u bodů představující poslední odraz, body ostatních odrazů jsou totiž klasifikovány jako vegetace. Množina bodů posledního odrazu představuje mix odrazů od vegetace a terénu a charakteristikou  $C$  je rozdělena do dvou skupin – první skupina má stejnou charakteristiku jako body ostatních odrazů (pravděpodobně vegetace) a druhá skupina

má charakteristiku  $C$  odlišnou, a právě body druhé skupiny jsou klasifikovány jako terén. Hranice, která určuje, zda se jedná o bod vegetace nebo terénu, je práh  $p$ . Ten je definován jako minimum hodnoty  $C$  po odstranění jednoho promile bodů s nejmenším  $C$  u bodů vegetace. Ukázka histogramů s vyznačenými prahovými hodnotami je na obrázku 18.



obr. 18: Histogramy hodnot kritéria  $C$

vlevo: histogram bodů posledního odrazu, vpravo: histogram bodů z jiných než posledních odrazů, zdroj: Lysák, 2016

Ve výsledném modelu jsou sice patrné i zbytky vegetace, ovšem poměrně dobře jsou zachovány detaily skalního terénu. Autor konstatuje, že i když dochází ke klasifikaci pouze na základě FWF informace, je výsledný DMR podstatně lepší než při jeho tvorbě ze všech bodů posledního odrazu. Je navrženo, aby byl popsán přístup zahrnutý jako doplněk ke stávajícím filtračním metodám nebo do funkce, která váží příslušnost bodu k terénu (nižší hodnoty  $C$  by zvyšovaly pravděpodobnost, že je bod na terénu).



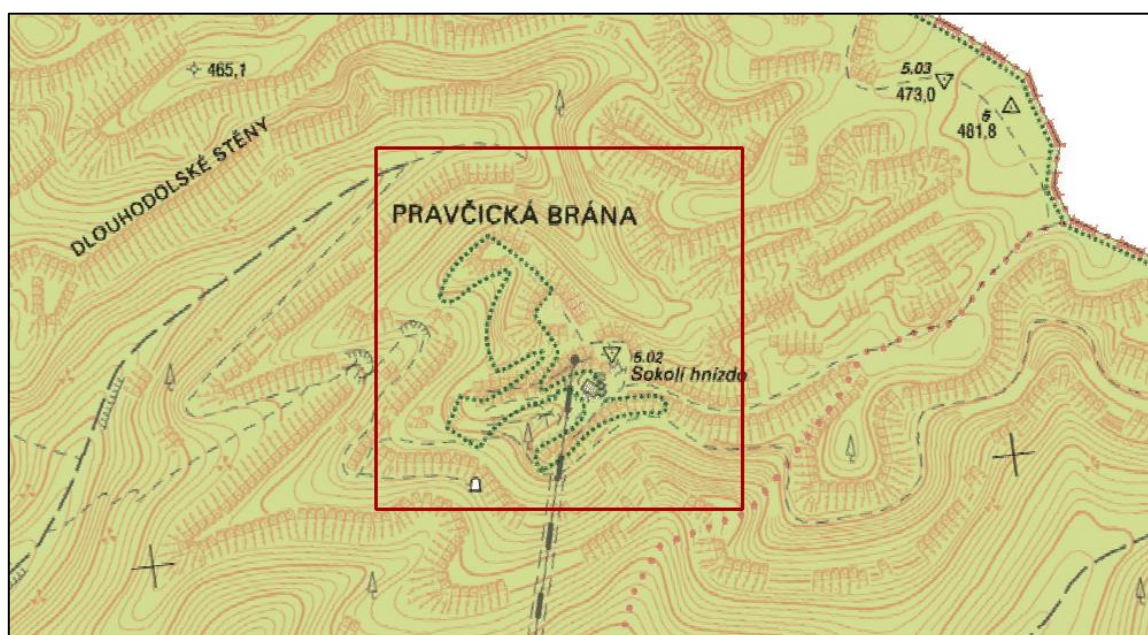
## 3 ZÁJMOVÁ ÚZEMÍ A DATA

### 3.1 Zájmová území

Protože je převážná část vzniklých segmentačních a filtračních algoritmů testována v rovinatém nebo mírně svažitém terénu, neposkytují filtry v členitém terénu ideální výsledky. Z toho důvodu je tato práce zaměřena právě na členitý terén, konkrétně na oblasti pískovcových skalních měst. Tento specifický typ krajiny je vybrán také proto, že i v nově vznikajících DMR na ČÚZK (DMR 4G, DMR 5G) se tyto oblasti upravují ručně. Oblastmi, ve kterých bude testován navržený algoritmus, je NP České Švýcarsko a CHKO Prachovské skály.

#### 3.1.1 České Švýcarsko

Konkrétním zpracovávaným územím v NP České Švýcarsko je okolí Pravčické brány o rozloze přibližně 17,5 ha (obr. 19).



obr. 19: Testovací lokalita České Švýcarsko  
zdroj dat: ČÚZK, 2016



Dnešní podoba Českého Švýcarska se utvářela od konce druhohor, kdy ustoupilo křídové moře. Vznik charakteristického reliéfu byl podmíněn tektonickým zdvihem způsobeným třetihorním Alpiským vrásněním a střídáním dob ledových a meziledových ve čtvrtohorách. Kombinace obojího způsobila intenzivní říční erozi a odnos materiálu v méně zpevněných místech pískovcové desky, a vznikly tak typické útvary, jako jsou vysoké skalní věže, plošiny, převisy, římsy, hluboké kaňony, brány a další. V celé oblasti je patrné počáteční stádium rozčleňování pískovcového masivu do samostatných skalních věží. (Národní park České Švýcarsko, 200-?)

Nejznámějším skalním útvarem Českého Švýcarska je právě Pravčická brána (obr. 20). Pískovcová skalní brána vznikla také erozivními procesy a selektivním odnosem materiálu. Nejdříve se v pískovcích vytvořil úzký ostroh vybíhající ze skalní plošiny, který se díky erozi a zvětrávání narušil a vytvořil se malý otvor, jež se postupně rozšiřoval až do dnešní podoby. Pravčická brána je největší svého druhu v Evropě – výška otvoru je 16 m a rozpětí oblouku ve spodní části 26,5 m. (Správa NP České Švýcarsko, 200-?)



**obr. 20: Pravčická brána**  
zdroj: archiv autorky

### 3.1.2 Prachovské skály

Prachovské skály jsou jedním z nejznámějších skalních měst v Česku. Geologický vývoj této rezervace je velmi podobný jako v Českém Švýcarsku. I zde se v období křídý nacházelo moře, na jehož dně docházelo k usazování pískovcových sedimentů. V průběhu třetihor v důsledku srážky dvou kontinentálních desek byla celá oblast vyzdvižena, moře ustoupilo a původní souvislý blok pískovců se rozlámал do řady samostatných tabulí. Postupným zvětráváním a erozí vznikly tvary skalního města, jako jsou skalní věže, voštiny, škrapy, skalní okna, skalní převisy

nebo skalní komíny (Pražák, 1994). V závěru třetihor se na tektonických zlomech projevila vulkanická činnost, která vytvořila i některé dnešní dominanty celého Českého ráje, jako například Trosky, Vyskeř, Velíš nebo Zebín (PSM, 2003-2011). Charakter skalního města je na rozdíl od Českého Švýcarska již plně vyvinutý (obr. 21), nachází se zde mnoho hlubokých strží a skalních věží vysokých až 30 m.

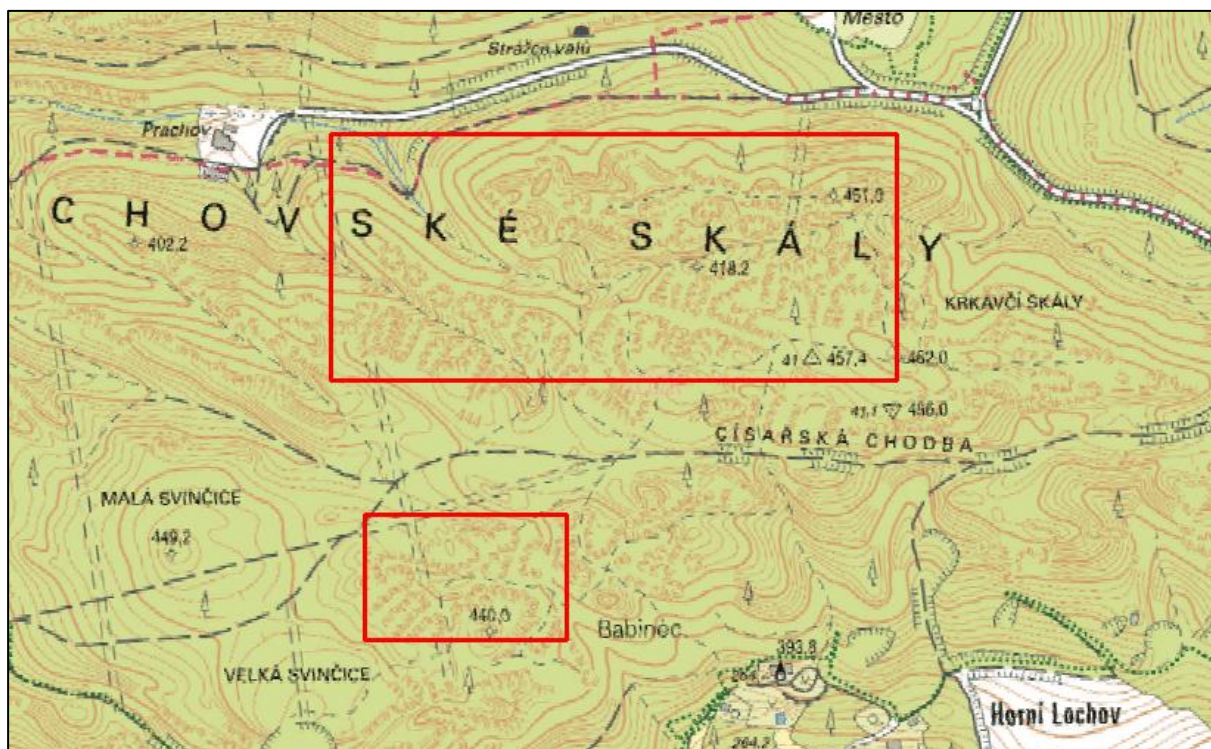


**obr. 21: Prachovské skály**  
zdroj: Fic, 2009-2016

Přírodní rezervace (PR) Prachovské skály se nachází v jihovýchodní části CHKO Český ráj přibližně 7 km od města Jičín. Celá rezervace má 264 ha, přičemž za účelem této práce byly vybrány pouze dvě menší lokality (viz obr. 22). První z nich je nazvaná „střed“, má rozlohu přibližně 19,1 ha ( $660 \times 290 \text{ m}^2$ ) a nachází se v okolí Císařské chodby v centrální části PR. Lokalita je charakteristická právě vysokými skalními věžemi a úzkými roklemi. Druhou lokalitou je „Babinec“ o rozloze 3,6 ha ( $240 \times 150 \text{ m}^2$ ). Zde jsou skalní útvary o něco nižší a převládají spíše skalní stěny. Lokality jsou nazvány podle Lysáka (2011), který se na stejných lokalitách pokoušel testovat možnosti využití full-waveform informace ke zlepšení kvality filtrace bodového mračka, a tím i k získání kvalitnějšího DMR v oblasti pískovcových skalních měst.

V letech 2007 a 2008 zasáhly Prachovské skály vichřice Kirill a Emma, v letech 2007-2010 pak proběhla kůrovcová kalamita. Z těchto důvodů se proto rozhodlo k rozsáhlému kácení smrkového porostu v centrální části PR Prachovské skály (Wildová, 2013), konkrétně v lokalitě „střed“. Díky tomu se otevřely nové pohledy na některé skály a vyhlídky. Kácení mělo pochopitelně i své odpůrce, ovšem data leteckého laserového skenování nasbíraná po této události, jsou pro tvorbu DMR velmi cenná.





obr. 22: Testovací lokalita Prachovské skály  
zdroj dat: ČÚZK, 2016

### 3.2 Data a jejich předzpracování

Použitá data byla pořízena v rámci společného Projektu tvorby nového výškopisu České republiky tří subjektů – ČÚZK, Ministerstva obrany a Ministerstva zemědělství (Dušánek, 2014). Data byla nasbírána metodou leteckého laserového skenování, které započalo v roce 2010 a skončilo v roce 2013.

Získané bodové mračno prošlo automatickou filtrací, ke které byl využit software SCOP++ s implementovanou hierarchickou robustní interpolací (princip algoritmu popsán v kapitole 2.4.1). Protože výsledek rozdělení bodů nacházejících se na povrchu a nad ním nebyl dokonalý, následovala manuální kontrola pomocí softwaru DT Master (Dušánek, 2014). Výslednými produkty nasnímaných dat jsou DMR 4G (forma pravidelné sítě 5x5 m), DMR 5G (forma nepravidelné sítě bodů) a DMP 1G (forma nepravidelné sítě bodů), přičemž doposud jediným dokončeným modelem pro celé území Česka je DMR 4G. Pro testované lokality již existují všechny tři zmíněné digitální modely.

V datech poskytnutých ZÚ je evidováno několik atributů, jejichž seznam je uveden v tabulce 3. Pro testování dat v této práci budou využity souřadnice x, y, z, amplituda a šířka odrazu, pořadí odrazu a celkový počet odrazů pulzu.

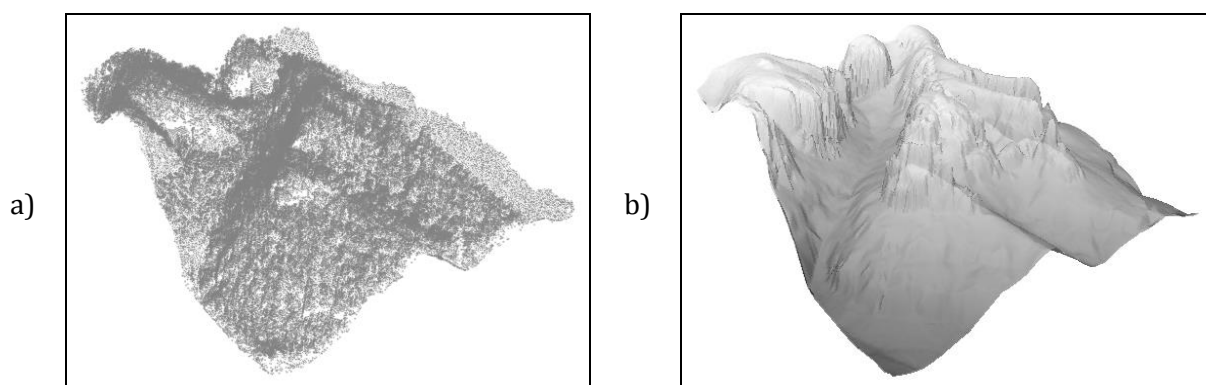
název	popis
X	souřadnice x
Y	souřadnice y
Z	souřadnice z
ID	ID bodu
AMPLITUDE	amplituda odrazu
WIDTH	šířka odrazu
TARGETTYP	způsob diskretizace full-waveform informace, hodnota z číselníku
TARGET	pořadí odrazu v pulzu
NUMTARGET	celkový počet odrazů pulzu
RGINDEX	hodnota na časové ose, při které nastává maximum
CHANNELDESC	kanál, kde byl odraz detekován
CLASSID	informace o tom, zda (případně jak) byl bod klasifikován (hodnoty podle specifikace formátu las 1.1), v datech pro všechny body stejná hodnota
TIME	čas měření

**tab. 3: Atributy dat získaných od ZÚ**

### 3.2.1 České Švýcarsko

Oblast Českého Švýcarska byla mapována v rámci pásma „Střed“ v letním období v roce 2010 (ZÚ, VGHMÚŘ, 2012; ZÚ, VGHMÚŘ, 2015a, b).

Data z Českého Švýcarska jsou klasifikována do pěti tříd – budova, hluboká chyba, terén, vysoká chyba a vegetace (ZÚ rozlišuje ještě mosty, ale v dané lokalitě se žádný nevyskytuje). Těchto hodnot nabývá atribut CLASS. Ovšem při bližším prozkoumání dat je právě v klasifikaci patrné velké množství hrubých chyb, kdy je vegetace označena jako budovy, i když se v dané oblasti žádné takové objekty nevyskytují. Pro vytvořený způsob hodnocení kvality segmentace sice zmíněná chyba nepředstavuje významný problém, avšak je nutné mít na vědomí, že i při jejím zanedbání není manuální klasifikace bezchybná. Příčinou jsou především složitý terén a pořízení dat v letním období, kvůli čemuž jsou ovlivněná listnatou vegetací.



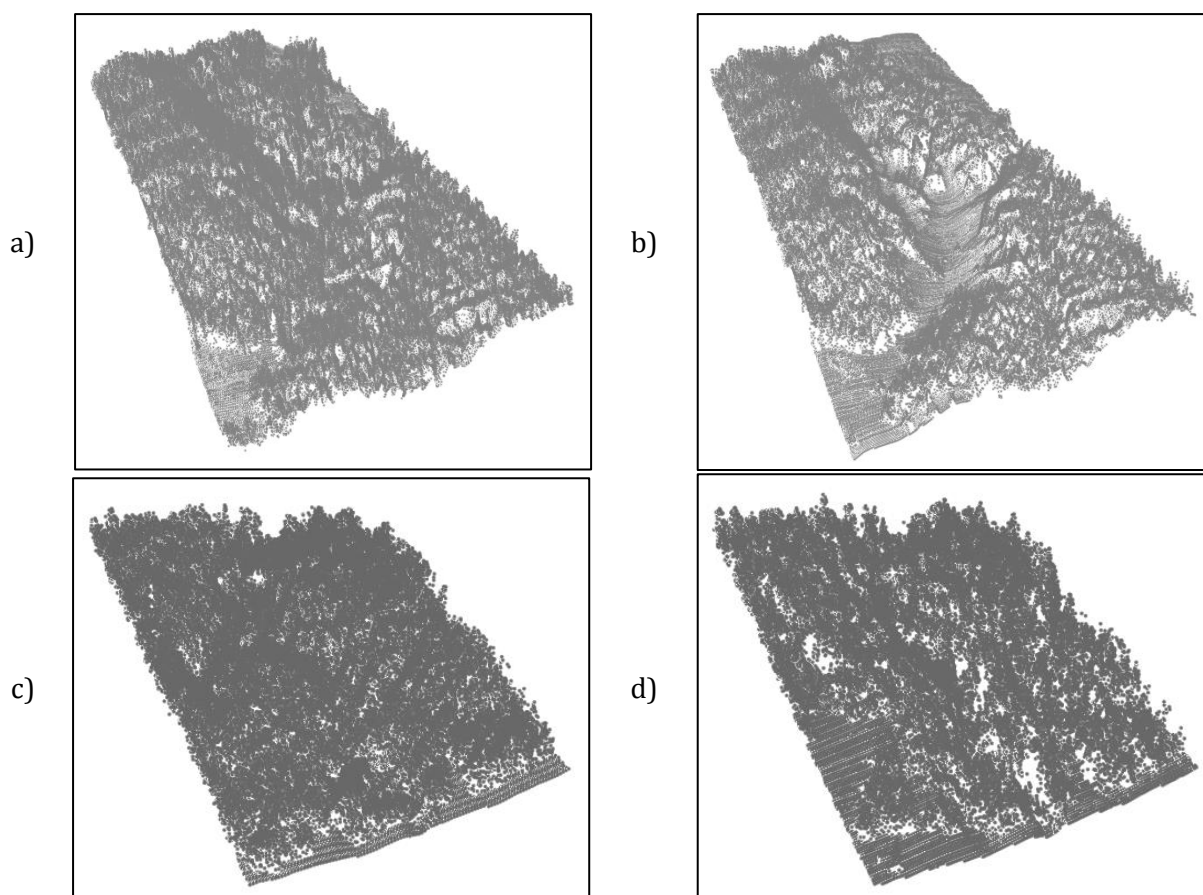
**obr. 23: Vizualizace dat Českého Švýcarska získaných od ZÚ**  
a) bodové mračno (všechny body), b) DMR, zdroj dat: ZÚ, vlastní tvorba

Testovací lokalita (obr. 23) je pokryta 293 008 body, z čehož vyplývá, že průměrná hustota je přibližně 1,7 bodu/m<sup>2</sup>, což odpovídá průměrné hustotě udávané pro území celého Česka, která je 1,6 bodu/m<sup>2</sup> (Pavelka, 2013). Ovšem území je hustě zalesněno, tudíž odrazů, které projdou až na povrch, je poměrně málo. Tento fakt způsobí, že výsledný DMR nebude tak podrobný. Přibližně 40 % bodů jsou jiné než poslední odrazy, u kterých je při klasifikaci dán předpoklad (podrobněji kapitola 4.1.5), že pochází právě od vegetace, čili pouze cca 180 tisíc bodů tvoří skupinu, ze které jsou vybírány body, z nichž bude vytvořen DMR.

Za účelem testování přesnosti vzniklých DMR je dále použit DMR (nazván myDMR) vytvořený v diplomové práci Lukáše Holmana (2013). Tento DMR vznikl přesnou registrací DMR 5G a dat leteckého laserového skenování pořízených v rámci mezinárodního projektu GeNeSiS. MyDMR oproti DMR 5G reprezentuje lépe oblasti skalních plošin, stěn i oblasti hustě pokryté vegetací (Holman, 2013).

### 3.2.2 Prachovské skály

Z oblasti Prachovských skal jsou k dispozici dvě datové sady. První z nich je z dubna roku 2008 a byla pořízena ještě v rámci experimentálního snímání, druhá pochází ze stejného skenování jako data Českého Švýcarska, čili z dubna 2010.



**obr. 24: Vizualizace dat Prachovských skal získaných od ZÚ**

a) lokalita střed z roku 2008, b) lokalita střed z roku 2010, c) lokalita Babinec z roku 2008, d) lokalita Babinec z roku 2010, zdroj dat: ZÚ, vlastní tvorba

Testovací lokalita „střed“ z roku 2008 má 308 494 bodů, sada z roku 2010 pouze 172 875, což vychází z faktu, že v dané lokalitě proběhlo rozsáhlé kácení, díky kterému pak nedošlo k několikanásobným odrazům od vegetace. Patrné je to i při pohledu na nezpracovaná bodová mračna (obr. 24). Lokalita „Babinec“ nebyla zasažena tak výrazně, a proto ani pokles bodů není tak významný, sada z roku 2008 má 56 840 bodů, sada z roku 2010 pak 41 481.

Data z Prachovských skal nejsou klasifikována, proto bylo nutné je nejprve předzpracovat, aby bylo možné zhodnotit v závěru kvalitu shlukování. Za tímto účelem byl využit DMR 5G dané oblasti. Hlavní myšlenkou tedy bylo klasifikovat ty body, které leží v povolené vertikální vzdálenosti od roviny TINu, jako terén, ostatní pak jako vegetace.

Ještě předtím bylo ale nutné převést data do stejných souřadnicových systémů, neklasifikovaná data z let 2008 a 2010 byla totiž získána v souřadnicovém referenčním systému UTM (zóna 33N, vztaženo k elipsoidu GRS 80), DMR 5G v S-JTSK (v ArcGIS Krovak East North). K převodu DMR 5G do souřadnicového systému WGS\_1984\_UTM\_Zone\_33N byl využit SW ETJTZU, který nepoužívá k převodu jen globální klíč, ale i grid-shift transformaci. Po transformaci byly vůči sobě datové sady ještě mírně prostorově posunuty, proto byly souřadnice bodů o tento rozdíl upraveny. Protože jsou data z let 2008 a 2010 tvořena pouze jedním letovým pásem, kdežto DMR 5G je složen z více pásů, bylo nutné nalézt takové hodnoty, které budou co nejlépe odpovídat co největšímu počtu bodů. Nakonec byly zvoleny konstanty uvedené v tabulce 4.

$\Delta x$	0,0304
$\Delta y$	0,0734
$\Delta z$	-0,1129

tab. 4: Konstanty posunu ve 3D

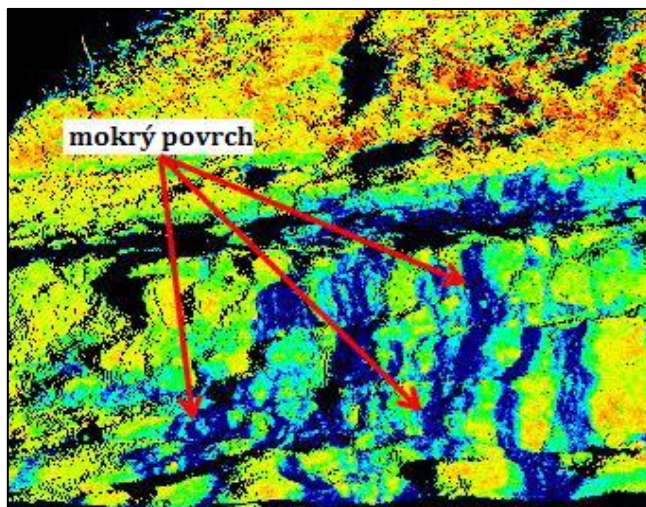
## 4 METODIKA ZPRACOVÁNÍ

Filtrační metody založené na porovnání jednoho bodu s jedním nebo více jinými body pracují obvykle lépe, když se terén mění pozvolna a objekty na něm jsou rovnoměrně rozmístěné. V případě, že tento požadavek není splněn, vznikají při filtraci větší chyby (Tóvári, Pfeifer, 2005). Protože naše testovaná data zachycují oblast pískovcových skal, čili velmi členitý terén, je navržený postup založený na segmentaci s následným přístupem klasifikace podle Lysáka (2011, 2016). Lepší výsledky při využití segmentačně založené filtrace bodového mračna oproti bodově založené filtraci jsou dosaženy i podle experimentálních srovnání, jak bylo uvedeno v kapitole 2 (např. Sithole, Vosselman, 2004, Mücke, 2008). Totéž potvrzují i Filin, Pfeifer (2006), kteří konstatují, že zpracování bodového mračna může být prvotním shluknutím informací obohaceno.

V procesu segmentace jsou kromě charakteristik založených na souřadnicích  $x$ ,  $y$ ,  $z$  využity i doplňkové informace o pulsu, konkrétně amplituda a šířka odrazu. Ty samy o sobě nenesou dostatečné množství informací, na základě kterých by mohlo dojít k filtraci bodového mračna (Mücke, 2008; Lysák, 2011), tudíž je nelze využít samostatně ani při segmentaci. V kombinaci s geometrickými informacemi však mají potenciál dosáhnout přesnějšího výsledku. Amplituda a šířka odrazu podávají informaci o mikrotopografii povrchu, čili lokální členitosti nebo drsnosti, materiálu a dalších vlastnostech. Z důvodu následné klasifikace podle Lysáka (2011, 2016) probíhá segmentace pouze na bodech posledního odrazu (podrobněji dále).

Je však nutné zmínit hned na začátku, že i při velmi sofistikovaném postupu segmentace a následné klasifikace (popř. filtrace) nelze dosáhnout výsledku, který by se stoprocentní přesností popisoval skutečnost. Důvodem je několik faktorů, které mají vliv na přímé měření odrazivosti, čímž ovlivňují hodnotu amplitudy (Kashani, Olsen, Parrish, Wilson, 2015). Autoři je rozdělují na geometrické faktory (př. větší úhel dopadu způsobí menší energii navraceného paprsku), charakteristiky povrchu (př. odrazivost nebo drsnost povrchů), vlastnosti samotného skenovacího zařízení a efekty okolního prostředí (př. vlhkost povrchu nebo propustnost atmosféry). Obrázek 25 zachycuje na příkladu skalního bloku právě vliv vlhkosti na velikost amplitudy, přičemž hodnota amplitudy s rostoucí vlhkostí klesá. Vliv vlhkosti (a některé další

faktory) v naměřených datech nelze nijak odstranit, což způsobuje, že v některých případech není možné jednoznačně rozlišit body různých kategorií povrchu.



**obr. 25: Vliv vlhkosti na velikost amplitudy**

modré plošky – vlhké → nižší amplituda, zdroj: Kashani, Olsen, Parrish, Wilson, 2015

#### 4.1 Princip navržené metodiky

Segmentační algoritmus využívá techniku region-growing a je složen z několika hlavních kroků, které jsou uvedeny v následujícím přehledu (tab. 5), podrobněji je pak celý proces popsán níže.

- nalezení neoznačeného bodu, který bude středem shluku (iniciální bod), a testování jeho vlastností s body v okolí
- tvorba zárodku shluku
  - nalezení bodů v okolí iniciálního bodu
  - testování podobnosti těchto bodů s iniciálním bodem; v případě úspěchu následuje
- postupná tvorba shluku
  - ke každému bodu v zárodku nalezení nejbližších bodů
  - testování těchto bodů, zda je lze přiřadit k zárodku shluku, a tím i do výsledného shluku

**tab. 5: Hlavní kroky shlukovacího algoritmu**

Shlukovací algoritmus pracuje iterativně, a to tak dlouho, dokud není každému bodu přiděleno číslo shluku, ke kterému je bod přiřazen. Na počátku je všem bodům přiřazena hodnota -1. Toto číslo ovšem nemá na výsledné přiřazení bodu do shluku žádný vliv, je pouze výhodné při vizuální kontrole průběžných výsledků, stejně tak mohla být zvolena nula nebo jakékoliv jiné číslo. Finální shluky jsou pak číslovány od jedné.



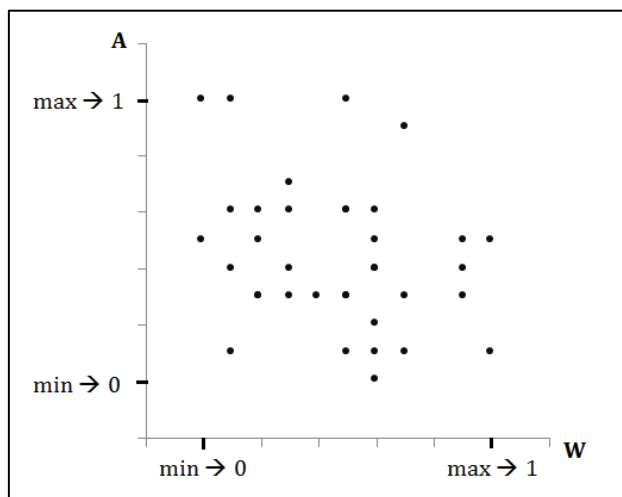
V algoritmu se vyskytuje hodně parametrů, jejichž hodnoty jsou uvedeny přímo v textu – v místě, kde je popsán vliv konkrétního parametru na výsledek segmentace. V případě, že se konstanta mění u jednotlivých variant (viz kapitola 5.1 Výsledky), jsou konkrétní hodnoty parametrů uvedeny v tabulce (tab. 8).

#### 4.1.1 Relativizace hodnot A, W

Všechny následující výpočty zahrnující informace o amplitudě a šířce odrazu probíhají s jejich relativními hodnotami. Získány jsou tak, že bodu s nejnižší hodnotou veličiny v souboru je přiřazena 0 a bodu s nejvyšší hodnotou číslo 1. Převod je proveden pro obě dvě sledované veličiny podle následujících vzorců.

$$A_{ri} = \frac{A_i - \min A}{\max A - \min A}, \quad W_{ri} = \frac{W_i - \min W}{\max W - \min W},$$

kde  $A_{ri}$ ,  $W_{ri}$  jsou relativní hodnoty amplitudy a šířky testovaných bodů,  $A_i$ ,  $W_i$  absolutní hodnoty amplitudy a šířky,  $\min A$ ,  $\min W$  jsou minima amplitudy a šířky bodů, analogicky  $\max A$ ,  $\max W$  jsou jejich maxima. Princip převodu je zachycen na obrázku 26.



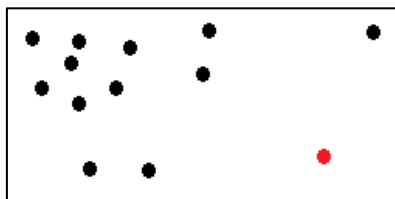
obr. 26: Relativizace hodnot A, W bodů v souboru  
zdroj: vlastní tvorba

Důvodem jejich převodu je snadnější a přehlednější práce s hodnotami a také větší nezávislost algoritmu na vstupních datech. Díky převodu je znám konkrétní interval hodnot, se kterými se pracuje, což je výhodné při stanovování jednotlivých parametrů.

#### 4.1.2 Testování iniciálního bodu

Proces začíná vyhledáním bodu s nejnižším ID, který ještě není přiřazen do žádného shluku. Tento bod (označme jej S) je testován, a to proto, že by mohla nastat podobná situace jako na obrázku 27, čili že je vybraný bod odlehlý nebo svými charakteristikami neodpovídá charakteristice bodů ve svém okolí (do vzdálenosti  $d_s$ ), případně kombinaci obojího. V takovém

případě není vhodné uvažovat o bodu S jako o středu budoucího shluku, a proto je označen jako samostatný shluk.



obr. 27: Odlehlý bod označený jako samostatný shluk  
zdroj: vlastní tvorba

Ukazatele, na základě kterých dochází k rozhodnutí o tom, zda je bod S v porovnání s body okolí anomální či ne, jsou dva. Prvním kritériem se ošetří, zda není bod S odlehlý. Za tímto účelem se sleduje, zda se v okolí o poloměru  $d_{test}$ , nachází ještě alespoň jeden bod. Poloměr testovacího okolí je definován jako

$$d_{test} \doteq 2 \cdot PV,$$

kde,  $PV$  je průměrná vzdálenost bodů bodového mráčka. Ta je v případě Českého Švýcarska 1,3 m, čili  $d_{test}$  nabývá hodnoty 2,6 m, hodnoty pro všechny použité datové sady jsou uvedeny v tabulce 6. Druhým ukazatelem je směrodatná odchylka amplitudy a šířky odrazu. V případě, že hodnoty amplitudy a šířky odrazu padnou do následujících intervalů a bod není odlehlý, je bod S považován za střed budoucího shluku.

$$\begin{aligned} \bar{A} - 2\sigma_A < A_S < \bar{A} + 2\sigma_A \\ \bar{W} - 2\sigma_W < W_S < \bar{W} + 2\sigma_W, \end{aligned}$$

kde  $\bar{A}$  a  $\bar{W}$  jsou průměry amplitudy a šířky odrazu bodů v okolí bodu S,  $\sigma_A$  a  $\sigma_W$  jsou směrodatné odchylky amplitudy a šířky  $A_S$  a  $W_S$  hodnoty amplitudy a šířky bodu S. Při použití dvojnásobku směrodatné odchylky každou z podmínek splní přes 95 % bodů, obě dvě zároveň tedy asi 90 % bodů.

	<i>PV</i>
České Švýcarsko	1,3 m
PS – střed 2008	1,3 m
PS – střed 2010	1,0 m
PS – Babinec 2008	1,3 m
PS – Babinec 2010	1,1 m

tab. 6: Průměrná vzdálenost bodů

Kdyby došlo k situaci, že se v okolí středového bodu nachází jen jeden bod, neměly by předchozí nerovnosti smysl, vzhledem k tomu, že směrodatná odchylka by byla rovna nule. Pro tento případ je definovaná podmínka, kdy se amplituda a šířka iniciálního bodu musí nacházet v intervalech

$$\begin{aligned} A_i - k_A < A_S < A_i + k_A \\ W_i - k_W < W_S < W_i + k_W, \end{aligned}$$

kde  $A_i$ ,  $W_i$  jsou amplituda a šířka odrazu bodu v okolí,  $A_S$  a  $W_S$  hodnoty bodu S,  $k_A$ ,  $k_W$  jsou zvolené konstanty pro amplitudu a šířku, o kterou se mohou tyto dva body lišit. Hodnoty konstant  $k_A$ ,  $k_W$  jsou nastaveny na 0,1, čemuž odpovídá rozdíl amplitudy a šířky 10 % z celkového rozsahu hodnot. Velikost těchto dvou konstant zůstala pro všechny zkoušené varianty stejná. Kdyby byla zvolená hodnota velká, byla by mnohem menší pravděpodobnost, že vytvořený shluk bude tvořen dvěma body stejné kategorie. Pokud body uvedené podmínky splňují, jsou společně označeny jako jeden shluk.

Velikost okolí, ve kterém jsou vyhledávány body k testování iniciálního bodu, je dána poloměrem kružnice  $d_s$  se středem v bodě S a je jedním z volitelných parametrů algoritmu. Je počítána podle vzorce

$$d_s = \sqrt{(x_s - x_i)^2 + (y_s - y_i)^2 + (z_s - z_i)^2},$$

kde  $x_s$ ,  $y_s$ ,  $z_s$  jsou souřadnice středového bodu S a  $x_i$ ,  $y_i$ ,  $z_i$  jsou souřadnice testovaných bodů. Teoreticky může  $d_s$  nabývat jakékoliv hodnoty, prakticky je však dobré zohlednit hustotu bodů, resp. průměrnou vzdálenost mezi body, přičemž velikost okolí by měla být větší než je průměrná vzdálenost bodů. Velikost okolí má vliv na velikost výsledných segmentů – v případě volby malého okolí bude výsledkem větší množství malých segmentů, v případě velkého okolí zase méně rozsáhlých segmentů.

#### 4.1.3 Tvorba zárodku shluku

V dalším kroku už by mohl probíhat výběr bodů na principu region-growing. Protože je ale více vypovídající srovnávat charakteristiky nově přidávaných bodů s již existující skupinou bodů a ne jen s jedním bodem, je v dalším kroku vytvořen tzv. zárodek budoucího shluku. Do něj jsou vybrány ty body z okolí, které jsou pro tvorbu shluku perspektivní. Výběr probíhá na základě podobných charakteristik bodů. Za tím účelem je spočítána vzdálenost bodu ke středovému bodu S ve dvourozměrném příznakovém prostoru, kde osami jsou amplituda a šířka odrazu. Vzdálenost  $d_{pp}$  je spočítána podle vzorce

$$d_{pp} = \sqrt{(A_s - A_i)^2 + (W_s - W_i)^2},$$

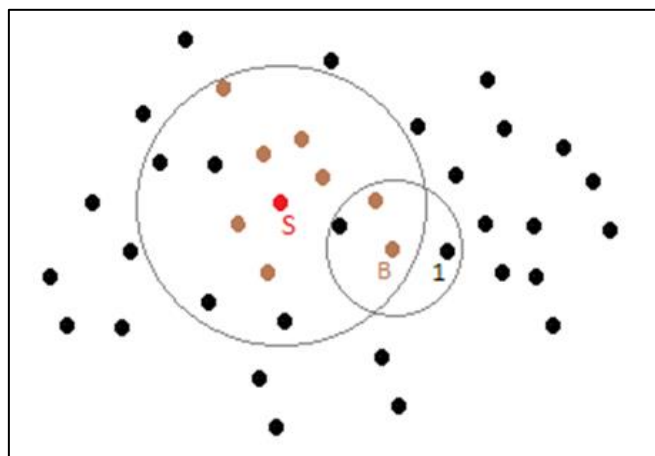
kde  $A_s$ ,  $W_s$  jsou amplituda a šířka odrazu středového bodu S a  $A_i$ ,  $W_i$  jsou amplituda a šířka odrazu testovaných bodů.

Bod je do zárodku vybrán tehdy, když je vzdálenost menší než definovaná prahová hodnota. Výběr bodů do zárodku shluku podléhá poměrně přísné podmínce, protože všechny tyto body již budou tvořit výsledný shluk, a navíc je tímto předvýběrem ovlivněna výsledná podoba shluku, proto je žádoucí, aby tyto body měly co nejpodobnější vlastnosti jako středový bod S.

#### 4.1.4 Rozrůstání shluku

V další fázi algoritmu už jsou ke každému bodu v zárodku hledány nejbližší body, které ještě nejsou součástí nějakého shluku, a testují se, zda je lze ke shluku přiřadit. Pro lepší orientaci v průběhu procesu je na obrázku 28 uveden modelový příklad současného stavu.

Kritéria, která musí být splněna, aby byl bod do shluku přiřazen, jsou dvě, resp. tři. Prvním je jeho vzdálenost v trojrozměrném prostoru, která nesmí být od libovolného bodu shluku větší než definovaný práh, druhým je Mahalanobisova vzdálenost, která musí být opět menší než definovaný práh. Posledním kritériem je výšková odchylka bodu od průměrné výšky bodů ve shluku. Výšková odchylka v základní podobě algoritmu není, pomocí ní je testováno, zda má výšková souřadnice  $Z$  větší vliv než polohové souřadnice  $X$  a  $Y$  (dále v kapitole 4.2).



obr. 28: Princip rozrůstání shluku

červený bod  $S$  – střed shluku, velká kružnice – okolí bodu  $S$ , hnědé body – body zárodku shluku,  $B$  – vybraný bod, ke kterému jsou v okolí (malá kružnice) vyhledány nejbližší body (bod 1), které ještě nejsou součástí žádného shluku a takové, které již nebyly jednou zamítnuty, a testují se, zda je lze přiřadit, zdroj: vlastní tvorba

Přidávání bodů do shluku je zastaveno, když žádný další bod nesplňuje kritérium proto, aby se stal bodem segmentu. V závěru každé iterace je středovému bodu a všem bodům, které splnily podmínky pro přidání do segmentu, v nově vytvořeném atributu přiřazeno stejné číslo shluku.

### Eukleidovská vzdálenost

Eukleidovská vzdálenost je počítaná v trojrozměrném prostoru podle vzorce

$$d_z = \sqrt{(x_z - x_i)^2 + (y_z - y_i)^2 + (z_z - z_i)^2},$$

kde  $x_z, y_z, z_z$  jsou souřadnice bodu v zárodku a  $x_i, y_i, z_i$  jsou souřadnice testovaných bodů. Vzdálenost  $d_z$  je poloměrem kružnice se středem v bodě zárodku, stejně jako je v první části algoritmu  $d_s$  poloměr kružnice se středem ve středovém bodě  $S$ . I pro tento parametr platí, že jeho velikost ovlivňuje množství a velikost výsledných shluků, čili čím větší hodnota tím méně rozsáhlejších shluků.

### Mahalanobisova vzdálenost

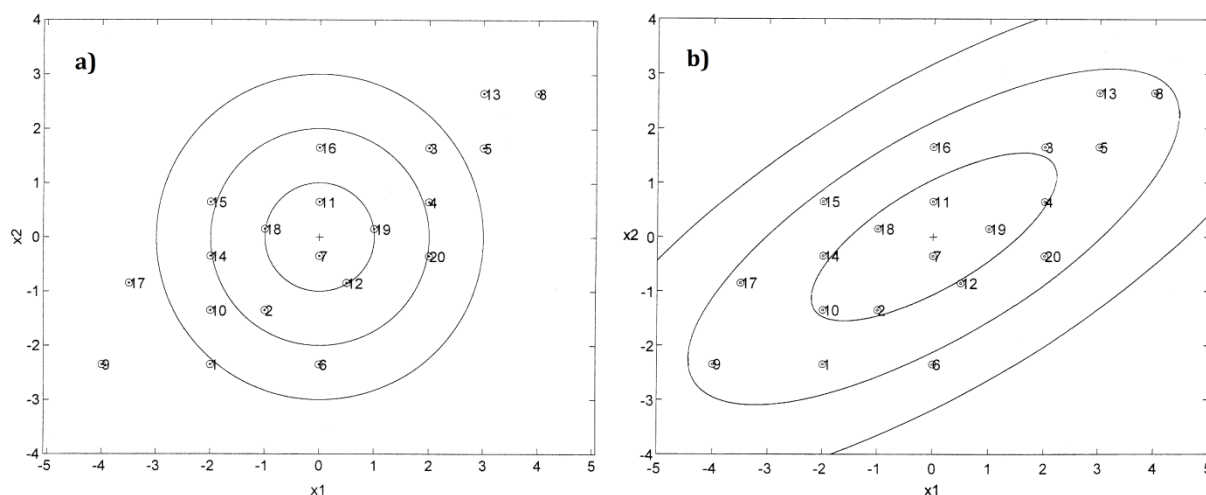
Mahalanobisova vzdálenost je ukazatel, který zohledňuje rozložení dat, tedy korelaci mezi parametry (De Maesschalck, Jouan-Rimbaud, Massart, 2000), kterými jsou v tomto případě amplituda a šířka odrazu. Z toho důvodu je Mahalanobisova vzdálenost (dále používána také zkratka MD – z anglického Mahalanobis distance) vhodnější než běžně používaná eukleidovská vzdálenost měřená v pravoúhlém souřadnicovém systému, včetně na stejném principu počítané

vzdálenosti v příznakovém prostoru (odmocnina ze součtu druhých mocnin rozdílů dvou bodů daných veličin). Může se tedy naskytnout otázka, proč není MD použita i při výběru bodů do zárodku. Odpověď je ale poměrně jednoduchá, při výpočtu MD jsou totiž srovnávány kandidátní body s již existující referenční skupinou, což je v případě tvorby zárodku pouze jeden bod, pro který nelze získat kovarianční matici.

V případě MD není množinou bodů, která má od těžiště jednotlivých proměnných stejnou vzdálenost, kružnice, ale elipsa (obr. 29), jejíž tvar je určen kovarianční maticí. Do výpočtu MD vstupují v našem případě také relativní hodnoty amplitudy a šířky odrazu. Mahalanobisova vzdálenost se počítá pomocí matic podle vzorce

$$MD = (X - T_s) \cdot (S_s)^{-1} \cdot (X - T_s)^T,$$

kde  $(X - T_s)$  je vektor vzdáleností bodů  $x_i$  od těžišť veličin bodů ve shluku,  $(X - T_s)^T$  je matice transponovaná. Kovarianční matice  $S_s$  pro dva parametry (amplituda a šířka odrazu) má rozměry  $2 \times 2$ , kde na hlavní diagonále leží rozptyly těchto veličin a na vedlejší diagonále jejich kovariance.



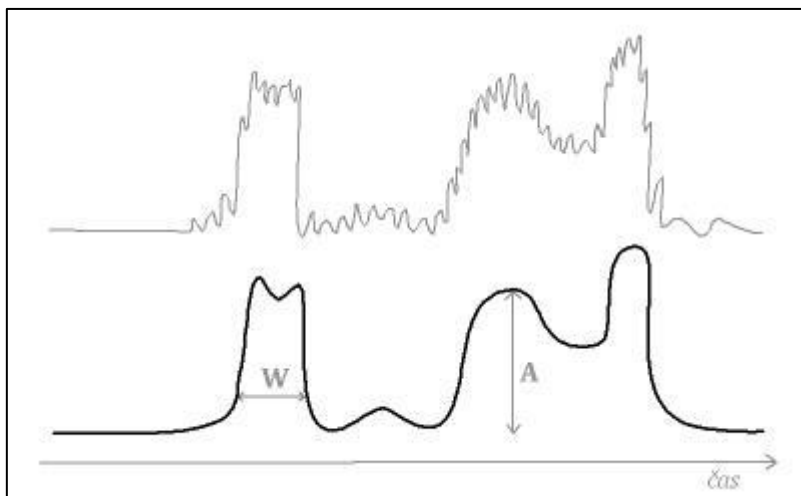
obr. 29: Srovnání eukleidovské a Mahalanobisovy vzdálenosti

a) Eukleidovská vzdálenost – stejnou vzdálenost od těžiště představuje kružnice, b) Mahalanobisova vzdálenost – stejnou vzdálenost od těžiště představuje elipsa, zdroj: De Maesschalck, Jouan-Rimbaud, Massart, 2000

Výpočet Mahalanobisovy vzdálenosti probíhá v příznakovém prostoru, z toho důvodů se s větší zvolenou hodnotou MD charakteristika vybraných bodů ve shluku různí. Je tedy nutné najít takovou hranici, která umožní tvorbu na jednu stranu co nejvíce homogenních shluků, ovšem na druhou zase ne příliš malých. V případě, že by bylo vytvořeno obrovské množství malých shluků s vysokou mírou homogenity, byla by následná filtrace nebo klasifikace poměrně obtížná a segmentace by nehrála v celém procesu zpracování laserových dat tak významnou roli.

Mücke (2008) uvádí, že se přesnost určení šířky v závislosti na velikosti amplitudy mění, konkrétně se přesnost šířky s rostoucí amplitudou zvyšuje. Tvrzení lze doložit modelovým příkladem na obrázku 30, ze kterého je patrné, že kvůli šumu je šířka odrazu s nízkou amplitudou velmi těžko odvoditelná. Z toho důvodu jsou jako kritérium zavedeny dvě různé

hodnoty Mahalanobisovy vzdálenosti, přičemž to, která bude pro daný bod vybrána, závisí právě na velikosti jeho amplitudy. Hraniční hodnota amplitudy je 12.

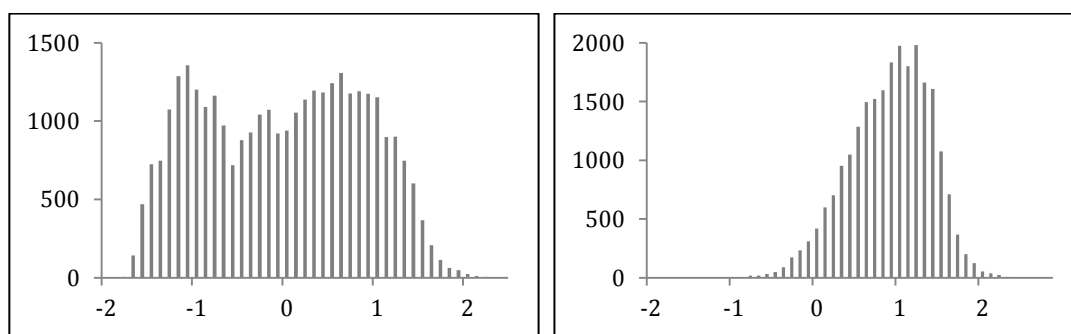


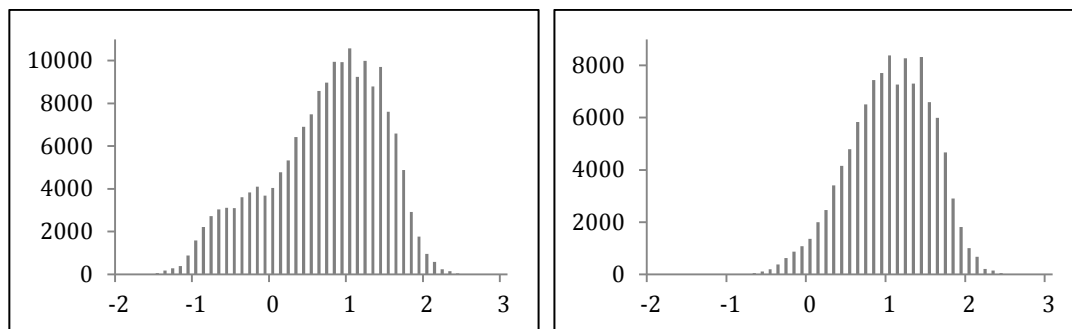
**obr. 30: Přesnost určení šířky odrazu**  
 nahoře: zašumělý puls, dole: vyhlazený puls, zdroj: vlastní tvorba

#### 4.1.5 Klasifikace shluků

Shluky vzniklé výše popsaným způsobem je třeba klasifikovat, aby bylo možné vytvořit DMR. Klasifikace probíhá podle konceptu Lysáka (2011, 2016). Za tím účelem jsou body rozděleny na body posledního odrazu a body ostatních odrazů. Pro obě dvě skupiny bodů je vypočtena charakteristika  $C$  jako

$$C = \log\left(\frac{\text{width}}{\text{amplitude}}\right).$$





obr. 31: Histogramy kritéria C

nahore: datová sada Babinec 2008, dole: České Švýcarsko, zdroj: vlastní tvorba

Histogramy obou skupin bodů pro České Švýcarsko a datovou sadu Babinec 2008 jsou zachyceny na obrázku 31. Ostatní sady z Prachovských skal mají velmi podobné rozložení charakteristiky C jako lokalita Babinec, proto zde nejsou uvedeny jejich histogramy (všechny histogramy jsou uvedeny v Lysák (2011)). Body V (obr. 31 vpravo) mají normální rozdělení, body L (obr. 31 vlevo) nikoliv. Protože se ale předpokládá, že body L jsou mixem odrazů od vegetace a terénu, lze jejich rozdělení považovat za součet dvou normálních rozdělení (Lysák, 2016). Jedno z nich bude mít stejné parametry ( $\mu$  a  $\sigma$ ) jako body V, druhé je pak dopočítáno pomocí softwaru R a nástroje normalmixEM z balíčku nástrojů mixtools. S využitím získaných informací lze podle Bayesovy věty vypočítat pravděpodobnost, s jakou se odraz chová jako terénní bod ( $p_g$ ) a s jakou jako bod vegetace ( $p_v$ ):

$$p_g = \frac{G \cdot pdf_g(C)}{(G \cdot pdf_g(C) + V \cdot pdf_v(C))} \quad \text{a} \quad p_v = \frac{V \cdot pdf_v(C)}{(G \cdot pdf_g(C) + V \cdot pdf_v(C))},$$

kde  $G$  je podíl bodů odpovídající terénu,  $V$  podíl bodů odpovídající vegetaci (podíly bodů jsou vztaheny k bodům L),  $pdf_g(C)$  je hustota pravděpodobnosti normálního rozdělení se střední hodnotou  $\mu$  a směrodatnou odchylkou  $\sigma$  odpovídajícími terénním bodům získaných z dat L,  $pdf_v(C)$  je hustota pravděpodobnosti normálního rozdělení s parametry  $\mu$  a  $\sigma$  odpovídajícími bodům V, přičemž obě dvě hustoty jsou spočtené pro  $C$  daného bodu jako

$$pdf(C) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(C-\mu)^2}{2\sigma^2}}.$$

Hodnoty konstant získané v programu R pro všechny datové sady jsou uvedeny v tabulce 7.

	$G$	$V$	$\mu_g$	$\mu_v$	$\sigma_g$	$\sigma_v$
České Švýcarsko	0,235	0,765	-0,121	0,460	0,196	0,226
PS – střed 2008	0,584	0,416	-0,255	0,385	0,259	0,213
PS – střed 2010	0,599	0,401	0,012	0,616	0,221	0,161
PS – Babinec 2008	0,588	0,412	-0,253	0,404	0,260	0,213
PS – Babinec 2010	0,593	0,407	-0,031	0,573	0,263	0,180

tab. 7: Konstanty získané v programu R

Protože je pro výpočet pravděpodobnosti příslušnosti bodů posledních odrazů (L) podle Bayesovy věty dán předpoklad, že všechny body představující jiný než poslední odraz (V) pulzu jsou odrazy od vegetace, probíhá i samotná segmentace pouze na bodech posledního odrazu. Tímto předpokladem sice dochází k chybnému určení třídy u malého množství bodů V (označeno jako  $V_e$ ), v Českém Švýcarsku je to konkrétně 0,73 % bodů V a v Prachovských skalách 0,15 – 0,36 % podle datové sady (tab. 8). Tato čísla jsou však vzhledem k celkovému množství bodů statisticky zanedbatelná. Podíl bodů byl zjištěn s využitím DMR 5G tak, že byly hledány body V, které jsou od povrchu DMR 5G vzdáleny nejvýše 9 cm (ve vertikálním směru), což je hodnota, která odpovídá polovině deklarované úplné střední chyby DMR 5G (ZÚ, VGHMÚŘ, 2015a).

	$V_e$
České Švýcarsko	0,73 %
PS – střed 2008	0,27 %
PS – střed 2010	0,36 %
PS – Babinec 2008	0,15 %
PS – Babinec 2010	0,17 %

tab. 8: Množství chybně klasifikovaných bodů jiných než posledních odrazů

Pro body L jsou tedy známy pravděpodobnosti příslušnosti k daným třídám. Celému shluku je pak přiřazena třída podle toho, která z nich vykazuje vyšší hodnotu součtu pravděpodobností příslušnosti bodů shluku k dané třídě. Tento způsob je výhodnější, než kdyby byl klasifikován každý bod samostatně, a kategorie shluku by byla určena podle většího bodového zastoupení. Stále se totiž pracuje s určitou mírou pravděpodobnosti, tudíž lze zavést v procesu klasifikace prahy, které musí být splněny, aby byl shluk označen jako terénní. Na základě výše zmíněného předpokladu jsou všechny body jiných než ostatních odrazů označeny jako vegetace.

Ze shluků označených jako terén je vytvořen DMR, a to tak, že je nejprve vytvořen TIN (aby byly zachovány terénní hrany), který je následně převeden na rastr.

## 4.2 Modifikace shlukovacího algoritmu

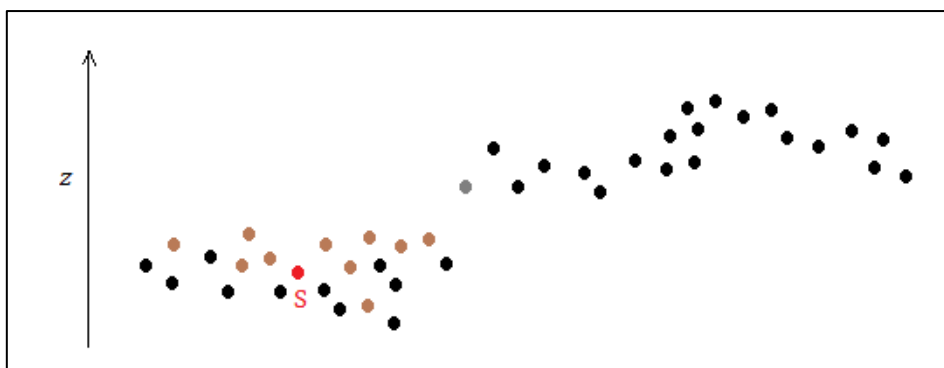
Při vzniku základního shlukovacího algoritmu se naskytlo několik možností, kterými by mohl být proces modifikován. Otázkou pak je, zda by při jejich aplikaci bylo dosaženo lepšího výsledku. Tyto úpravy v procesu shlukování jsou popsány v následujících podkapitolách.

### 4.2.1 Výšková odchylka

Výšková odchylka jako kritérium při rozrůstání segmentu je vztažena k průměrné výšce bodů již zařazených do shluku. Při jejím zařazení je definována i výšková odchylka při výběru bodů do zárodku shluku, ta je vztažena k výšce středového bodu S. Kritérium je zařazeno i přes to, že výpočet vzdálenosti probíhá v trojrozměrném prostoru. V této situaci je totiž dán předpoklad, že výšková souřadnice Z má při vzniku DMR větší význam než polohové souřadnice X a Y.



Na obrázku 32 je uvedena modelová situace, kdy se testuje šedý bod, zda ho lze přiřadit ke shluku, a i přesto, že leží dostatečně blízko a má vhodnou amplitudu i šířku odrazu, není ke shluku přiřazen, protože nesplňuje výškové kritérium.



**obr. 32: Výškové kritérium – modelový příklad**

červený bod S – střed shluku, hnědé body – body rozrůstajícího se shluku, šedý bod – testovaný bod, zdroj: vlastní tvorba

Díky tomuto kritériu je mírně omezeno rozrůstání shluku ve vertikálním směru, a vytvořené shluky jsou v tomto směru kompaktnější. Výhodné je to především v případě náhlé změny v průběhu povrchu. Menší vliv má kritérium na odlišení terénu od stěny budovy, která by měla být oddělena již pomocí amplitudy a šířky odrazu. Za jistou nevýhodu lze považovat použití výškové odchylky při segmentaci bodů představujících koruny stromů, které se rozprostírají právě do výšky.

Hodnota výškové odchylky použitá jak při rozrůstání shluku, tak zařazení bodů do zárodku, je stanovena na 1,5 m.

#### 4.2.2 Průběžná aktualizace matic pro výpočet Mahalanobisovy vzdálenosti

Dále bylo testováno, jak se upraví rozřazení bodů do shluků při změně vstupních dat při výpočtu Mahalanobisovy vzdálenosti. Tato změna se týká kovarianční matice  $S_s$  a matice hodnot veličin vztažených k jejich těžišti  $(X - T_s)$ . V základní verzi shlukovacího algoritmu se matice vypočítávají z bodů, které tvoří zárodek shluku Y, a jsou po celou dobu rozšiřování tohoto konkrétního shluku Y neměnné. Takový přístup je založen na předpokladu, že body zárodku jsou pro dané okolí reprezentativní a v průběhu rozšiřování shluku jsou vyhledávány právě takové body, které jsou bodům v zárodce podobné. Výsledné shluky tak mají tendenci být o něco menší než v následující testované variantě.

Druhou možností je, že se dané matice přepočítají po přidání každého bodu. V tom případě bude zárodek sloužit pouze jen jako vstupní sada bodů, která nebude mít na výslednou podobu shluku tak výrazný vliv. Z toho důvodu je přístup výhodný v případě, když se do zárodku dostanou i body, které nejsou pro okolí zcela reprezentativní.

## 5 VÝSLEDKY A HODNOCENÍ

### 5.1 Výsledky

#### 5.1.1 Segmentace

V následující kapitole jsou představeny výsledky, kterých bylo dosaženo navrženým shlukovacím algoritmem. Na datech z Českého Švýcarska bylo vytvořeno 8 různých kombinací volitelných parametrů, které jsou přehledně zobrazeny v tabulce 9. Varianty 1, 2, 5, 6, 7, 8 představují základní verzi algoritmu, kde byly pouze změněny hodnoty parametrů  $d_s$ ,  $d_{pp}$ ,  $d_z$ ,  $MD_1$ ,  $MD_2$ . Varianty 3 a 4 obsahují jednu z obměn algoritmu, jež byly popsány v kapitole 4.2.

varianta	$d_s$	$d_{pp}$	$d_z$	$MD_1$	$MD_2$	výšková odchylka	aktualizace MD
1	3	0,15	2	1	2	-	-
2	3	0,2	2	1,5	3	-	-
3	3	0,2	2	1,5	3	1,5	-
4	3	0,2	2	1,5	3	-	ano
5	3	0,3	3	1,5	3	-	-
6	4	0,15	3	1	2	-	-
7	5	0,2	2	1,5	3	-	-
8	7	0,2	2	1,5	3	-	-

**tab. 9: Použité varianty parametrů pro testování shlukovacího algoritmu – České Švýcarsko**

pozn.:  $d_s$  je velikost okolí, ze kterého jsou vybírány body do zárodku shluku, výběr probíhá podle vzdálenosti v příznakovém prostoru  $d_{pp}$ ,  $d_z$  je vzdálenost, ve které jsou vyhledávány body při rozrůstání shluku podle kritérií  $MD_1$  (Mahalanobisova vzdálenost pro body s amplitudou menší nebo rovno 12) a  $MD_2$  (Mahalanobisova vzdálenost pro body s amplitudou větší než 12), podrobněji vysvětleno v kapitolách 4.1.2, 4.1.3, 4.1.4

V rámci testování algoritmu byly vyzkoušeny i menší a větší hodnoty parametrů, než jak je uvedeno v předcházející tabulce. Ovšem ani v jednom případě není shlukování příliš vhodné – při použití malých hodnot dochází k tvorbě poměrně malých shluků, a především velkého množství jednobodových shluků, naopak při vyšších hodnotách proměnných dochází k tvorbě většího množství shluků, které tvoří mix odrazů od vegetace a terénu, což je však v určité míře pozorovatelné u všech variant.

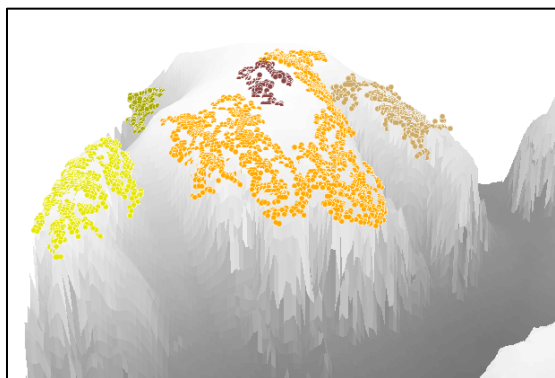
Dosažené výsledky procesu shlukování jsou uvedeny v tabulce 10. Sledován je celkový počet vytvořených shluků, z čehož je následně odvozena průměrná velikost shluku. Průměrná hodnota je velmi ovlivněna množstvím shluků tvořených jedním bodem a největším vytvořeným segmentem. Obecně lze konstatovat, že čím menší hodnoty parametrů jsou zvoleny, tím je získáno více menších segmentů.

varianta	počet shluků	podíl shluků s 1 bodem*	počet bodů v největším shluku	průměrná velikost shluku
1	62 887	18,8 %	178	2,9
2	53 538	16,6 %	6 344	3,4
3	65 560	19,9 %	407	2,8
4	54 996	16,6 %	118	3,3
5	36 303	13,6 %	43 569	4,9
6	39 269	11,6 %	29 040	4,6
7	25 803	6,3 %	2 242	7,0
8	16 141	4,2 %	1 310	11,2

tab. 10: Dosažené výsledky jednotlivých variant – České Švýcarsko

\* podíl shluků s 1 bodem je vztažen k celkovému počtu bodů

Na první pohled se může zdát, že je chybou, když mají největší segmenty až tisíce bodů. Ovšem v případě především variant s nižšími hodnotami parametrů metody se shluky vyznačují vysokou mírou homogenity, a proto jsou rozsáhlé shluky vítány. Dokonce i ve variantě 5, která se vyznačuje vyššími hodnotami parametrů počítaných v příznakovém prostoru, jsou vytvářeny početné shluky, které odpovídají realitě, resp. digitálnímu modelu (viz obr. 33). Obecně ale platí, že čím vyšší jsou hodnoty zvolených parametrů, tím více se vyskytují v segmentech terénu i body, které podle vizuální kontroly zaznamenávají spíš odraz od stromu. Jednoznačným důkazem toho je varianta 8, ve které je zvětšen pouze poloměr vyhledávání kolem iniciálního bodu, a již tím je způsobena tvorba tzv. falešně neklidného terénu, který je viditelný pouhým okem v místech, kde se ve všech ostatních variantách vytvořil hladký povrch (obr. 34). Falešně neklidným terénem je nazvaná situace, kdy jsou v datech body vegetace nízko nad povrchem klasifikovány právě jako terén (odvozeno z pojmu neklidný terén užívaného v archeologii ve významu méně výrazných nerovností (např. Hojerová, John, Kocina, a kol., 2014)).



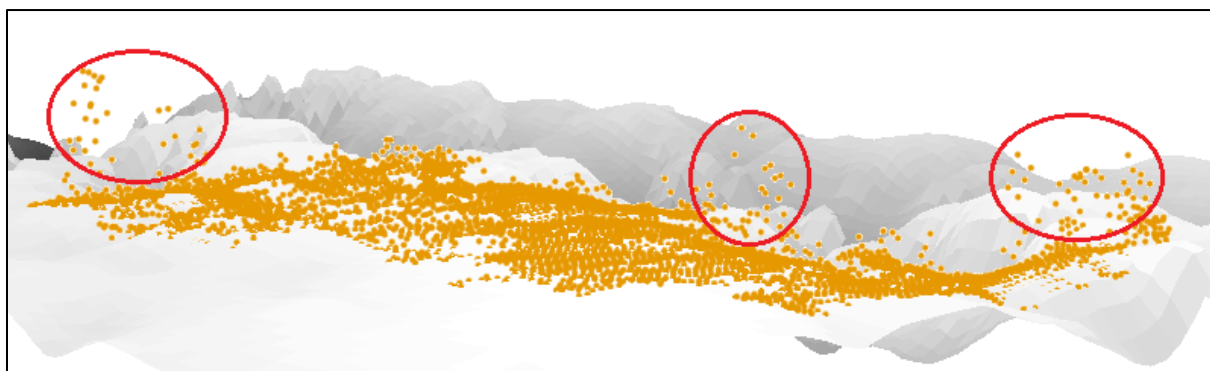
obr. 33: České Švýcarsko – varianta 5 – vybrané rozsáhlé shluky představující terén  
zdroj dat: ZÚ, vlastní tvorba



obr. 34: České Švýcarsko – varianta 8 – falešně neklidný terén  
zdroj dat: ZÚ, vlastní tvorba

Zcela jiná situace nastává na datech z Prachovských skal. Charakteristiky amplituda a šířka odrazu bodů nabývají menších rozsahů hodnot, což znamená, že body jsou si těmito vlastnostmi podobnější, a tím pádem je vhodnější volit nižší hodnoty parametrů. Vyzkoušeny byly dvě varianty segmentačního algoritmu.

První z nich je varianta 2, jejíž výsledek na datech z Českého Švýcarska byl jedním z nejlepších dosažených. Tato varianta však neposkytla příliš uspokojivý výsledek, vytvořené shluky na první pohled vykazují vysokou míru heterogenity. Na rozdíl od shluků představující terén Českého Švýcarska, ve kterých byly body vegetace jen zřídka, v Prachovských skalách v lokalitě střed i Babinec je tento jev velmi častý (příklad viz obr. 35).



obr. 35: PS-střed, 2010 – varianta 1 – chybně vytvořený shluk představující terén  
zdroj dat: ZÚ, vlastní tvorba

Aby docházelo k tvorbě homogennějších shluků, aktualizuje se ve druhé variantě po přidání každého bodu Mahalanobisova vzdálenost, a dále byly zmenšeny hodnoty parametrů počítaných v příznakovém prostoru. Obě dvě varianty (shrnutí tab. 11) byly otestovány na datech z roku 2008, tedy před vykácením lesa z důvodu vichřic a kůrovcové kalamity, a poté i na datech z roku 2010, čili po kalamitě.

varianta	$d_s$	$d_{pp}$	$d_z$	$MD_1$	$MD_2$	výšková odchylka	aktualizace MD
1	3	0,2	2	1,5	3	-	-
2	3	0,1	2	0,5	1	-	ano

tab. 11: Použité varianty parametrů pro testování shlukovacího algoritmu – Prachovské skály

Druhou variantou bylo vytvořeno na všech datových sadách podstatně víc shluků a významně se snížila velikost největších shluků. Přehledné statistiky jsou uvedeny v tabulce 12. Očekávalo se, že budou v tomto případě vytvořeny menší shluky, přičemž terénní shluky budou lépe kopírovat DMR. Výsledky však tento předpoklad příliš nepotvrdily, shluky jsou sice tvořeny méně body, stále však vizuálně vykazují vysokou míru heterogenity. Srovnání probíhá s DMR 5G, který je ovšem v Prachovských skalách na mnoha místech značně generalizovaný, a je tedy možné, že alespoň některé shluky s nižší mírou homogenity jsou ve skutečnosti vytvořeny správně.

lokalita	varianta	počet shluků	podíl shluků s 1 bodem	počet bodů v největším shluku	průměrná velikost shluku
střed	2008	1	49 669	13,4 %	2 362
		2	73 676	19,7 %	46
	2010	1	42 239	16,0 %	4 317
		2	62 831	23,9 %	35
Babinec	2008	1	9 733	29,7 %	574
		2	14 306	43,7 %	35
	2010	1	8 077	13,7 %	3 375
		2	12 123	20,9%	121

tab. 12: Dosažené výsledky jednotlivých variant – Prachovské skály

### 5.1.2 Klasifikace

V dalším kroku probíhala klasifikace segmentovaného mračna bodů, konkrétně bodů posledního odrazu (vysvětlení viz kapitola 4.1.5). Jak již bylo napsáno, klasifikace probíhá na základě součtu pravděpodobností příslušnosti bodů ve shluku. Aby bylo dosaženo co nejlepších výsledků, byly pro zařazení segmentu do třídy terén použity prahy. Pro data Českého Švýcarska jsou zavedeny dva. Práh  $K$  podává informaci o vzájemném vztahu mezi pravděpodobnostmi příslušnosti dvou klasifikovaných tříd (konkrétně  $K$  násobek):

$$\frac{p_g}{p_v} > K.$$

Pro shluky do velikosti tří bodů je zaveden druhý práh  $P_{gmin}$ , který udává minimální pravděpodobnost příslušnosti shluku ke kategorii terén. Čili aby byl takový shluk klasifikován jako terén, musí splnit zároveň obě dvě podmínky:

$$p_g > P_{gmin} \quad \text{a} \quad p_g > K \cdot p_v.$$

$P_{gmin}$  nabývá pro všechny varianty hodnotu 0,99. Hodnoty použitých parametrů  $K$  jsou shrnuty v tabulce 13.

varianta	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$
	$n \leq 3$	$4 \leq n \leq 10$	$11 \leq n \leq 100$	$n \geq 101$	$n \geq 400$
1	19	6	1,1	0,85	-
2	17	7	1,45	0,40	-
3	17	7	1,45	0,40	-
4	17	7	1,45	0,40	-
5	19	10	1,5	0,35	-
6	21	13	2,5	0,3	-
7	10	9	2	0,3	0,1
8	8	7	1,7	0,2	0,1

tab. 13: Parametry použité při klasifikaci segmentů dat – České Švýcarsko  
pozn.:  $n$  značí počet bodů ve shluku

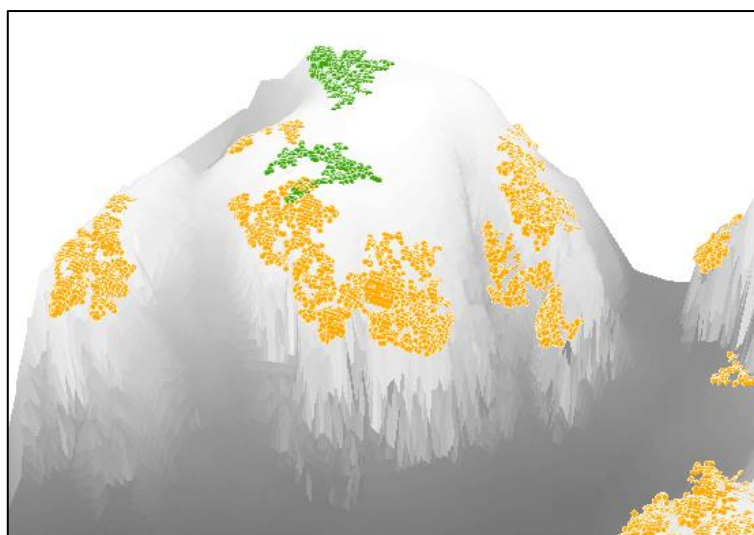
Pro data z Prachovských skal se tyto parametry nedaly převzít beze změny, protože body z obou testovaných lokalit vykazují podstatně vyšší příslušnost k terénu. Důvodem toho je vyšší podíl  $G$  oproti  $V$  vystupující ve výpočtu pravděpodobnosti příslušnosti podle Bayesovy věty. Použit je pouze parametr  $K$ , jehož hodnoty jsou shrnuty v tabulce 14.

Hodnoty byly vždy voleny tak, aby bylo ve výsledném DMR co nejvíce bodů, čili aby nebylo prahováním odstraněno mnoho shluků, které při vizuální kontrole leží na povrchu, ale zároveň aby do něj bylo zařazeno co nejméně bodů, které tvoří jednoznačně vegetaci.

lokalita	varianta	$K_1$ $n \leq 3$	$K_2$ $4 \leq n \leq 10$	$K_3$ $11 \leq n \leq 100$	$K_4$ $n \geq 101$
střed	2008	1	10 000	1 000	100
		2	15 000	1 500	50
	2010	1	10 000	1 000	100
		2	20 000	2 000	50
Babinec	2008	1	20 000	1 000	100
		2	25 000	2 000	100
	2010	1	20 000	1 000	100
		2	25 000	1 500	100

tab. 14: Parametry použité při klasifikaci segmentů dat – Prachovské skály  
pozn.:  $n$  značí počet bodů ve shluku

Obecným problémem klasifikace je, že některé body, resp. shluky představující vegetaci, mají stejné vlastnosti jako povrch. Dochází pak tedy k situaci, kdy i shluky s několika desítkami bodů jsou klasifikovány chybně. Kdyby měla být prahová hodnota změněna tak, aby právě tyto shluky byly klasifikovány správně, určilo by se špatně několikanásobně více jiných shluků. Záleží tedy na nastavení prahu, resp. nalezení optimální hranice mezi množstvím bodů vegetace zařazených do DMR a terénních bodů odstraněných z DMR.



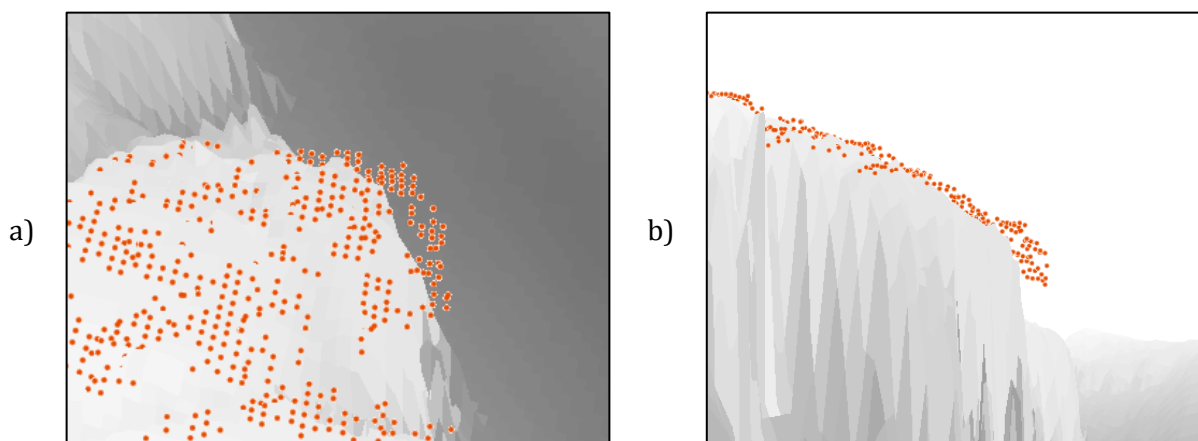
obr. 36: České Švýcarsko – varianta 2 – chybně klasifikované rozsáhlé segmenty  
oranžové body: správně klasifikované shluky - terén, zelené body: chybně klasifikované shluky - vegetace, zdroj dat: ZÚ, vlastní tvorba

V datech pocházejících z Českého Švýcarska u shluků vytvořených na úpatích skalních stěn, v údolích nebo pod hustou vegetací je pak častá relativně nízká pravděpodobnost příslušnosti k třídě terén. Z toho důvodu jsou hodnoty parametru  $K_4$  dokonce menší než 1. I tak se ale klasifikují některé shluky chybně (viz obr. 36), protože dalším snížením prahové hodnoty by bylo opět vytvořeno větší množství jiných chyb.

Napříč všemi vytvořenými variantami je již při vizuální kontrole bodů klasifikovaných jako terén patrné, že jsou velmi dobře reprezentovány oblasti skalních plošin, terénní body jsou v těchto místech poměrně husté a jen minimálně se zde nachází chybně klasifikované body a očekávaný jev, tzv. „falešně neklidný terén“.

Na některých okrajích skalních plošin dokonce nedochází oproti DMR 5G k jejich velkému vyhlazení. Na obrázku 37 je demonstrován příklad velmi rozsáhlého shluku, který přesahuje DMR 5G, všechny jeho body leží přímo na povrchu, proto lze i bez terénního průzkumu předpokládat, že i přesahující body rovněž reprezentují terén. Někde je tomu ovšem právě naopak a body z okrajů plošin jsou z výsledného modelu klasifikací odstraněny, což je způsobeno rozdílnými odrazovými vlastnostmi těchto bodů.

Jiné detaily průběhu skalních stěn zaznamenané příliš nejsou. Důvodem je jednak velmi málo pořízených bodů, dále pak i to, že právě tyto body nemají jednoznačnou charakteristiku terénních bodů, tudíž shluky ve velké míře není možné prahováním odlišit od vegetace.



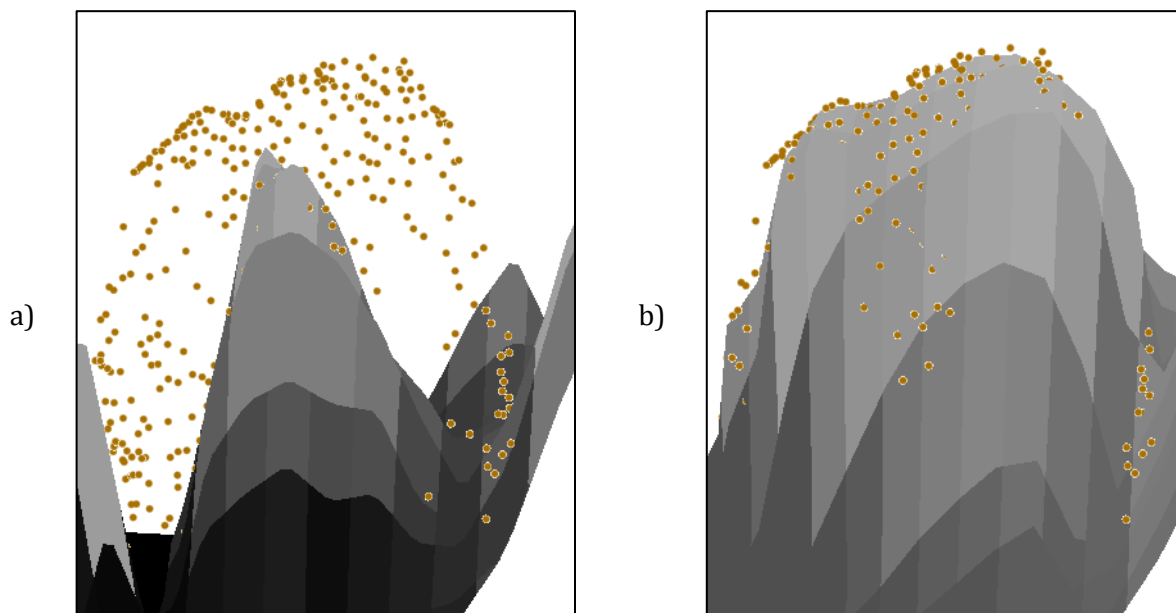
obr. 37: České Švýcarsko – varianta 5 – demonstrace situace na okrajích skalních plošin

a) pohled zhora, b) horizontální pohled, zdroj dat: ZÚ, vlastní tvorba

V údolích je situace odlišná, vegetace je zde velmi hustá, proto i bodů odražených od terénu je podstatně méně, průběh modelu proto není plynulý, přechody jsou spíše skokovité. Přestože výsledné DMR nepopisují skutečnost v těchto místech dostatečně podrobně, jsou výškové odchylky od DMR 5G na většině těchto míst spíše v řádech nižších desítek centimetrů (nejčastěji do 30 – 40 cm). Problémem v nižších polohách jsou však jednoznačně chybně klasifikované shluky, kvůli kterým je pak odchylka od DMR 5G místy dokonce i přes 15 m.

V Prachovských skalách se shluky klasifikovaly hůře, důvodem je v první řadě vysoká pravděpodobnost příslušnosti shluků ke třídě terén (příčina popsána výše), kvůli čemuž ve výsledných DMR zůstalo nižší patro vegetace, druhým důvodem je pak oproti Českému Švýcarsku mnohem větší členitost území. I přes zmíněné problémy doprovázející tvorbu

digitálního modelu jsou ve výsledných DMR místa, která jsou na první pohled vytvořena lépe než v DMR 5G. Dokladem je například skalní věž na obrázku 38, která v případě modelu od ČÚZK z velké části zcela chybí.



obr. 38: PS-střed, 2008 – varianta 1 – skalní věž v DMR 5G a vytvořeném DMR  
a) DMR 5G, b) vytvořený DMR, zdroj dat: ZÚ, vlastní tvorba

V závěru byly ze segmentovaných a klasifikovaných bodových mračen vytvořeny DMR (příloha 2). Z důvodu zachování hran byl nejprve vytvořen TIN, který byl následně převeden na rastr.

## 5.2 Hodnocení

### 5.2.1 Segmentace

Referenčními daty použitými při hodnocení kvality segmentace jsou pro České Švýcarsko tatáž data laserového skenování jako ta, na kterých bylo provedeno testování. Za účelem hodnocení je využit atribut *class*, který nabývá pěti hodnot (budova, hluboká chyba, terén, vysoká chyba a vegetace). Klasifikace při zpracování dat na ZÚ byla nejprve automatická, poté prošla manuální kontrolou. Ovšem i tak, jak již bylo zmíněno výše, je především klasifikace kategorií vegetace a budovy často chybná, resp. dochází k záměně vegetace za budovu. Z toho důvodu dochází ke sjednocení kategorií budova, vegetace a vysoká chyba, kde jsou často k nalezení i vrcholky stromů, do jedné skupiny jako body na povrchu. Body terénu tvoří druhou skupinu, přičemž do skupiny je přidáno i 14 bodů klasifikovaných ZÚ jako hluboké chyby, i když na první pohled lze označit jako chybu pouze jeden bod s výškou -158,8 m.

Data z Prachovských skal klasifikována nebyla, proto byla tato informace bodům přiřazena následovně s využitím DMR 5G. Jako terénní body byly určeny ty, které leží od povrchu vzniklého interpolací dat DMR 5G ve vzdálenosti do 9 cm. Za účelem nalezení terénních bodů

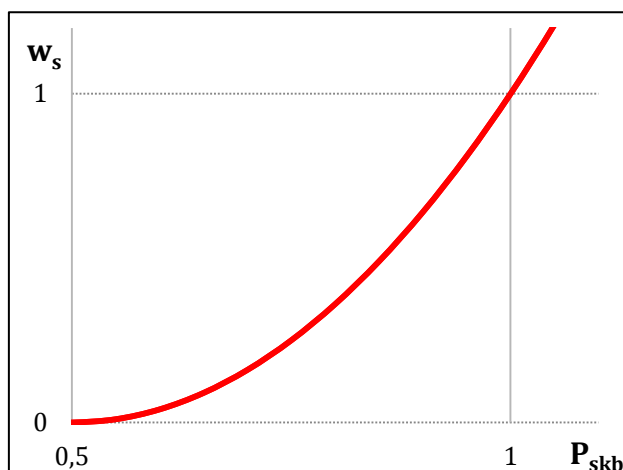


byla využita funkce *Interpolate Shape* v programu ArcGIS. Ostatní body jsou určeny jako vegetace.

Principem hodnocení shlukování je zjistit homogenitu shluku. Za tím účelem se nejprve vypočte, jaký podíl bodů v každém shluku je klasifikován shodně, čili jaký podíl tvoří body na povrchu a jaký body terénu. Protože máme dvě kategorie, může být nejnižší podíl 50 %, tomu je přiřazena váha 0. Váha 1 je dána shluku, který je ze 100 % tvořen jednou kategorií. Ostatní váhy jsou určeny podle podílu bodů kategorie s větším zastoupením, výpočet je dán předpisem

$$w_s = (2 \cdot P_{skb} - 1)^2,$$

kde  $P_{skb}$  je podíl shodně klasifikovaných bodů ve shluku. Jedná se o kvadratickou funkci, kdy parabola protíná osu x v hodnotě 0,5 (čemuž odpovídá 50 %) a v bodě  $w_s = 1$  nabývá hodnoty  $P_{skb} = 1$ . Graf funkce je na obrázku 39.



obr. 39: Graf funkce výpočtu váhy shluku  
zdroj: vlastní tvorba

Míra homogenity  $h$  je pak vypočtena jako vážený průměr

$$h = \frac{\sum w_{s_i} \cdot P_{skb_i}}{\sum w_{s_i}},$$

kde  $w_{s_i}$  jsou váhy konkrétních segmentů a  $P_{skb_i}$  jsou podíly shodně klasifikovaných bodů ve shluku.

Průměrné homogenity shluků jednotlivých variant jsou sepsány v tabulkách 15 a 16. V případě shluků vytvořených na datech z Českého Švýcarska se homogenita pohybuje nad hranicí 99 %, pouze varianta 8 vykazuje homogenitu 98,9 %, což potvrdilo poznatky z vizuální kontroly shluků (model již obsahuje více vegetace v DMR). Zajímavé je, že takto vysokou mírou homogenity, tedy přes 99 %, jsou charakterizovány i shluky vytvořené na datech z Prachovských skal, i když výsledné modely popisují realitu podstatně hůře. Vliv na výsledek má totiž velké množství jednobodových segmentů, které mají míru homogenity 100 %, čímž se celková hodnota výrazně zvýší.

varianta	homogenita $h$
1	99,71 %
2	99,72 %
3	99,74 %
4	99,68 %
5	99,79 %
6	99,58 %
7	99,25 %
8	98,90 %

tab. 15: Míra homogenity shluků jednotlivých variant – České Švýcarsko

lokalita	varianta	homogenita $h$
střed	2008	1 99,77 %
		2 99,78 %
	2010	1 99,57 %
		2 99,57 %
Babinec	2008	1 99,69 %
		2 99,77 %
	2010	1 99,49 %
		2 99,56 %

tab. 16: Míra homogenity shluků jednotlivých variant – Prachovské skály

Kromě průměrné míry homogenity shluků byla vytvořena charakteristika nazvaná kvalita segmentace. Ta zohledňuje na rozdíl od míry homogenity i množství bodů v segmentu, v hodnocení se dále projevuje podíl třídy s větším zastoupením v největším shluku, a především se redukuje velký vliv jednobodových segmentů. Kvalita segmentace je vypočtena podle vzorce

$$q = \frac{\frac{\sum w_{s_i} \cdot P_{skb_i} \cdot n_i}{\sum w_{s_i} \cdot n_i} - P_{s1} + h_{n_{max}}}{2},$$

kde  $n_i$  je velikost shluku,  $P_{s1}$  podíl shluků s jedním bodem a  $h_{n_{max}}$  je míra homogenity shluku s největším počtem bodů. Hodnota  $q$  může teoreticky nabývat nejvýše hodnoty 2, přičemž čím vyšší hodnoty nabývá, tím je segmentace z hlediska tohoto hodnocení zdařilejší. Podíl jednobodových shluků je odečten proto, aby byla zohledněna efektivita procesu segmentace, protože v případě, kdy například téměř polovina bodů tvoří samostatné shluky, již o velké efektivitě mluvit nelze. Míra homogenity největšího shluku je přičtena jako protiváha k podílu jednobodových segmentů, vzorec je totiž založen na předpokladu, že v případě volby nízkých hodnot volitelných parametrů ve shlukovacím algoritmu jsou vytvářeny méně početné shluky s vyšší mírou homogenity, ale zároveň i větší množství jednobodových shluků. Teoreticky lze říci, že když je velký podíl jednobodových shluků, bude i vysoká míra homogenity největšího shluku a opačně, v kombinaci s váženou mírou homogenity pak získáváme hodnoty  $q$  (uvedeny v tabulkách 17 a 18).

varianta	kvalita $q$
1	86,5 %
2	82,0 %
3	83,9 %
4	87,9 %
5	77,8 %
6	83,0 %
7	82,5 %
8	75,7 %

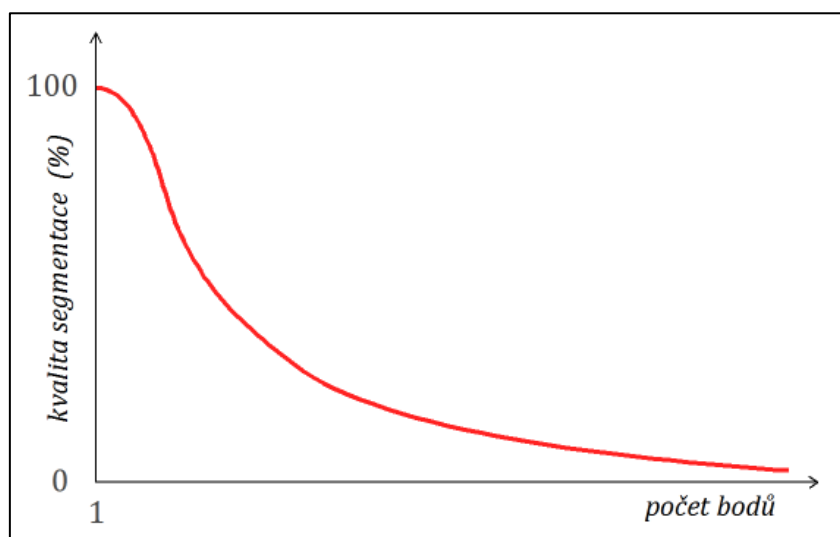
tab. 17: Kvalita segmentace jednotlivých variant – České Švýcarsko

lokalita	varianta	kvalita $q$
střed	2008	1 89,5 %
		2 88,4 %
	2010	1 82,4 %
		2 67,5 %
Babinec	2008	1 81,4 %
		2 77,7 %
	2010	1 81,5 %
		2 65,5 %

tab. 18: Kvalita segmentace jednotlivých variant – Prachovské skály

Absolutní hodnoty kvality segmentace  $q$  nejsou v rámci hodnocení tak důležité, i když varianty s  $q$  nižší než 75-80 % již nejsou ke zpracování dat LLS z hlediska efektivity segmentace příliš vhodné, ať je to způsobeno nízkou homogenitou shluků nebo vysokým počtem jednobodových shluků. Statistika  $q$  říká, že dobrého výsledku je u Českého Švýcarska dosaženo variantami 1 a 4, dále pak také 2, 3, 6 a 7. V Prachovských skalách je dosaženo vyšší kvality  $q$  variantou 1, v případě dat z roku 2010 oproti variantě 2 dokonce o 15 %, což je způsobeno převážně příliš vysokým podílem jednobodových shluků.

Důležitou otázkou je závislost velikosti shluků s kvalitou celého procesu segmentace. Jde o to, aby byla segmentace na jednu stranu co nejlepší, na druhou ale také efektivní. V případě, že by byl každý bod samostatným shlukem, byla by kvalita segmentace stoprocentní, ovšem efektivita nulová. Druhým extrémem by bylo, kdyby byly všechny body v jednom shluku. Závislost mezi kvalitou segmentace a průměrným počtem bodů ve shluku zachycuje graf na obrázku 40.



obr. 40: Graf závislosti počtu shluků na kvalitě segmentace  
zdroj: vlastní tvorba

Na základě tohoto grafu bylo snahou zpětně zvolit ideální hranici počtu bodů ve shluku (a k tomu očekávanou odpovídající kvalitu), od které by byly odvozeny dílčí parametry procesu segmentace. Z dosažených výsledků vychází, že vhodnou průměrnou velikostí shluku jsou 3-4 body, což odpovídá kvalitě segmentace 80-90 %. Odvozené parametry segmentace, kterými lze dosáhnout těchto výsledků, jsou sepsány v tabulce 19.

$d_s$	$d_{pp}$	$d_z$	$MD_1$	$MD_2$	aktualizace MD
3	0,15-0,2	2	1-1,5	2-3	-/ano

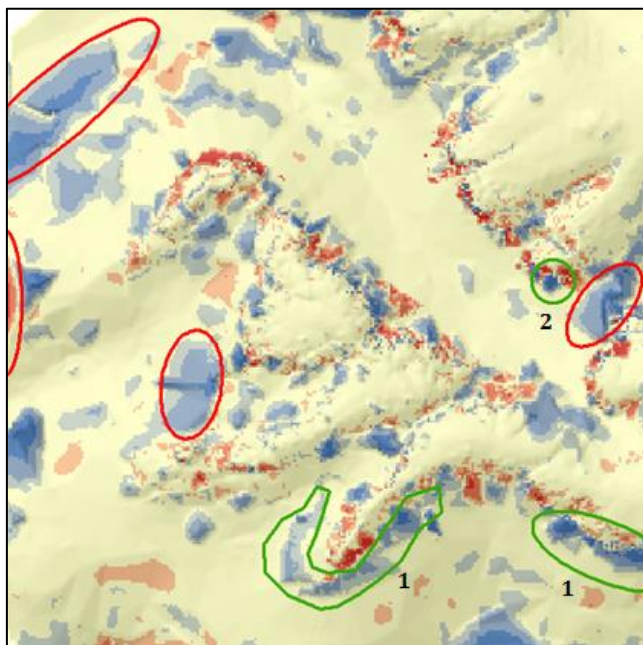
tab. 19: Doporučené parametry segmentačního algoritmu

### 5.2.2 Klasifikace

Hodnocení klasifikace je provedeno ve dvou rovinách, jednou z nich je interpretační přístup, druhou pak statistický. Za účelem vizuálního hodnocení klasifikace byly vytvořeny rozdílové rastry zachycující rozdíl mezi výškou DMR 5G a dané varianty (viz příloha 2). V červených

odstínech jsou zakreslena místa, kde je DMR 5G nad modelem vzniklý zde navrženou metodou, v oblastech modrých ploch zase pod ním. Rozdílové rastry graficky odpovídají poznatkům popsáním v kapitole 5.1.2.

Z rozdílových rastrů je patrné, že některé chyby se opakují ve všech použitých variantách, vlastnosti bodů jsou tedy velmi podobné vlastnostem druhé kategorie, a ani jinak vytvořený nebo jinak velký shluk v daném místě výslednou podobu modelu příliš nezmění. Sedm takových míst v Českém Švýcarsku je zachyceno na obrázku 41. Některá z nich mohou ale naopak signalizovat, že chybně vytvořený je právě DMR 5G. Příkladem takové možné chyby je terénní stupeň na úpatí skalního výběžku (na obr. 41 označeno číslem 1), na kterém se nachází Pravčická brána. Aby však mohla být tato místa správně vyhodnocena, byl by nutný terénní průzkum, protože z ortofot ani pohledových fotografií nelze přítomnost malého terénního stupně potvrdit ani vyloučit. Druhým místem, které je označeno jako možná chyba DMR 5G, je malé rozšíření skalní plošiny (na obr. 41 označeno číslem 2), které po vizuální kontrole dat DMR 5G a především dat z projektu GeNeSis terénu skutečně odpovídá.



**obr. 41: Vybrané opakující se chyby (varianta 2)**

červená – chyby ve vytvořených DMR, zelená – možné chyby DMR 5G, zdroj dat: ZÚ, vlastní tvorba

Ke statistickému hodnocení je opět využit DMR 5G, v Českém Švýcarsku pak navíc model Lukáše Holmana jako doposud nejpřesněji vytvořený DMR. Hodnocení spočívá ve výpočtu standardně používané střední kvadratické chyby (zkratka RMSE z anglického *root mean square error*), jejímž základem je výpočet rozdílů výšek v každém pixelu mezi dvěma digitálními modely:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^n (h_{DMR\ 5G} - h_{DMR_l})^2}{n}}.$$

Druhou statistickou hodnotnou je pak i samotný průměrný rozdíl, který nám podává informaci o tom, jestli je nově vytvořený model oproti DMR 5G podhodnocen nebo nadhodnocen. Výpočet probíhá podle vzorce

$$\bar{\Delta}h = \frac{\sum_{i=1}^n (h_{DMR\ 5G} - h_{DMR_i})}{n}.$$

Hodnoty obou ukazatelů jsou uvedeny v tabulkách 20 a 21. Posledními statistickými hodnotami, které doplňují údaje z těchto tabulek, jsou maximální rozdíly mezi vytvořenými DMR a DMR 5G. Jedná se jak o nejvyšší kladný, tak záporný rozdíl. Tyto hodnoty jsou uvedeny v příloze 2 u každého rozdílového rastru.

varianta	DMR 5G		myDMR	
	RMSE [m]	$\bar{\Delta}h$ [m]	RMSE [m]	$\bar{\Delta}h$ [m]
<b>1</b>	4,39	-1,13	4,09	-1,11
<b>2</b>	4,35	-1,22	4,28	-1,16
<b>3</b>	4,33	-0,84	4,07	-0,79
<b>4</b>	4,25	-0,82	3,98	-0,81
<b>5</b>	4,37	-1,01	4,08	-0,93
<b>6</b>	4,23	-0,87	3,93	-0,83
<b>7</b>	4,22	-1,08	4,07	-1,04
<b>8</b>	5,03	-1,64	5,03	-1,63

tab. 20: Statistické ukazatele hodnocení kvality klasifikace – České Švýcarsko

lokalita	varianta	RMSE [m]	$\bar{\Delta}h$ [m]
<b>střed</b>	<b>2008</b>	<b>1</b>	10,04
		<b>2</b>	9,79
	<b>2010</b>	<b>1</b>	7,47
		<b>2</b>	7,28
<b>Babinec</b>	<b>2008</b>	<b>1</b>	7,80
		<b>2</b>	7,73
	<b>2010</b>	<b>1</b>	6,95
		<b>2</b>	6,55

tab. 21: Statistické ukazatele hodnocení kvality klasifikace – Prachovské skály

V Českém Švýcarsku se pohybují hodnoty RMSE mezi 4,22 a 4,39 m, čili přesnost jednotlivých variant se liší v řádech centimetrů, pouze poslední varianta již vykazuje vyšší chybu (5,03 m), která je dána již příliš velkým poloměrem vyhledávání. Ukazuje se tak, že při vhodné volbě prahových hodnot při samotné klasifikaci lze dosáhnout téměř stejně přesných DMR z různých velkých segmentů. Hodnoty RMSE při srovnání s modelem myDMR, který terén zachycuje lépe než DMR 5G, mají hodnotu o 20-30 cm nižší, pouze varianta 8 vykazuje stále stejně vysokou chybu. Obecně tedy znamená, že část chyby je způsobena také nedostatečnou přesností DMR 5G, případně myDMR. Na první pohled se může zdát, že chyba RMSE, která má hodnotu přes 4 m, je značná, ovšem je třeba si uvědomit, že testovaná lokalita se nachází v členitém území, kde i jen

velmi malou změnou velikosti rozlohy skalní plošiny vznikají náhlé rozdíly ve výšce až v řádech desítek metrů.

Hodnota průměrného rozdílu výšek se pohybuje mezi -0,82 a -1,22 m v porovnání s DMR 5G a mezi -0,81 a 1,63 m v porovnání s myDMR. Všechny vytvořené DMR tedy vykazují záporný průměr, což říká, že jsou oproti DMR 5G a myDMR nadhodnocené, průměrně zhruba o 1 m. Důvodem toho jsou především chybně určené shluky vytvořené vysoko v korunách stromů klasifikované jako terén.

Statistiky popisující kvalitu vytvořených DMR na datech Prachovských skal rovněž potvrzují vizuální hodnocení segmentace i klasifikace. Hodnoty RMSE jsou v některých variantách dokonce dvakrát vyšší než v případě Českého Švýcarska, a to i přesto, že největší a nejmenší rozdíly od DMR 5G nejsou tak velké jako v Českém Švýcarsku. DMR Prachovských skal totiž obsahují velké množství vegetace a většina území má kvůli tomu odchylku od DMR 5G více než 6-10 m. V Českém Švýcarsku je tomu naopak, většina území má odchylku nejvýše 1-2 m a jen na okrajích skalních útvarů dochází k nárůstu rozdílu až ke zmíněným desítkám metrů (i 50 m). Důsledkem je, že ze vzniklých DMR je v případě Českého Švýcarska jednoznačně patrný charakter území, v případě lokalit Prachovské skály – střed i Babinec je to o poznání horší.

Druhá varianta vykazuje oproti variantě 1 RMSE nižší o 7-40 cm v závislosti na datové sadě, ani tak ale není přesnost vytvořených modelů srovnatelná s modely z Českého Švýcarska. Lepšího výsledku bylo podle očekávání dosaženo na datech z roku 2010, a to díky vykácení lesního porostu na části území, i přes to, je však chyba RMSE stále vysoká.

## 6 DISKUZE

V literatuře zabývající se zpracováním dat leteckého laserového skenování se nejčastěji vyskytují práce, které popisují filtrační algoritmy, pro něž jsou vstupem body představující poslední odraz pulzu. Jedním z důvodů je to, že autoři těchto studií pracují s daty, která byla pořízena technologicky jednodušším způsobem, čili byl zaznamenán například jen první a poslední odraz. Data zapůjčená od ZÚ mají evidované doplňkové informace o pulzu a zaznamenán je každý odraz. Proto na počátku této práce bylo uvažováno, že bude snahou pracovat se všemi získanými odrazy, protože v případě výběru bodů jen některých odrazů dochází ke ztrátě informací. Ovšem předpokladem použité klasifikační metody je, že všechny body jiných než posledních odrazů (body V) pochází od vegetace, proto došlo i při segmentaci k omezení na práci pouze s body posledního odrazu (body L). Na první pohled se tedy může zdát, že jsme tímto výběrem přišli o určité informace, ovšem ve skutečnosti nesou body ostatních odrazů informaci o tom, že tvoří vegetaci, a jen velmi malé procento z nich je do této kategorie zařazeno chybně, konkrétně 0,15 – 0,73 % bodů V (podle varianty, rozepsáno v tabulce 8), což je vzhledem k velkému množství zpracovávaných bodů zanedbatelná hodnota.

S cílem ověřit možnost využití doplňkových informací o pulzu k segmentaci a následné klasifikaci bodového mračka v členitém terénu byly vybrány tři lokality, jedna v okolí Pravčické brány v Českém Švýcarsku, další dvě (Babinec a střed) pak v Prachovských skalách. Charakter těchto území se mírně liší, především oblast Prachovské skály – střed je charakteristická již jako plně vyvinuté skalní město. Typická pro všechna území je hustá vegetace.

### Segmentace

Stěžejní částí této práce byla tvorba segmentačního algoritmu a jeho aplikace na vybraná data. Výsledky procesu segmentace vedou k úvahám, jež budou rozebrány v několika následujících odstavcích.

V případě dat z okolí Pravčické brány jsou shluky vytvářeny korektně a v převážné většině případů je na rozhraní terénu a vegetace patrné jednoznačné oddělení těchto tříd, čili nedochází příliš k mixování bodů různých kategorií. Na obrázcích v kapitole 5.1.2 (obr. 33, 36) je pak dokumentováno, jak i poměrně rozsáhlé shluky kopírují povrch DMR 5G. V případě Prachovských skal však ani při použití velmi přísných podmínek při rozšiřování shluku nejsou



vytvářeny takové segmenty, jež by kopírovaly DMR 5G jako v Českém Švýcarsku. Příčinou jsou velmi podobné naměřené odrazové vlastnosti vegetace a terénních bodů. V mnoha případech ovšem není ani vizuálně patrné, o jakou třídu bodu se jedná, navíc byla nalezena místa, která jsou v DMR 5G vytvořena chybně, proto je třeba to při hodnocení míry homogenity  $h$ , kvality segmentace  $q$  i chyby RMSE (hodnocení klasifikace) vzít v úvahu.

V různých variantách použitých parametrů, resp. jejich hodnot, vzniká různé množství jednobodových segmentů. V případě Českého Švýcarska je to konkrétně 4,2 – 19,9 %, v Prachovských skalách 13,7 – 43,7 % celkového počtu bodů, čili rozdíly jsou poměrně značné. V Českém Švýcarsku ve variantě 8 je sice vytvořeno nejméně shluků s jedním bodem, za to pak ale vykazuje oproti ostatním variantám nižší míru homogenity. I přes to lze však říci, že tato verze může být použita, a to především v případě zpracování rozsáhlého území, kdy je kladen důraz spíše na obecný charakter území. V opačném případě se může zdát, že když téměř pětina bodů, resp. polovina v případě Prachovských skal, tvoří samostatné shluky, není shlukování příliš efektivní. S tím lze však souhlasit jen částečně. I když je číslo poměrně vysoké, což není zcela žádoucí, nesou i tyto shluky důležitou informaci, a to tu, že mají natolik odlišné vlastnosti od bodů v okolí, že s nimi shluk za námi definovaných podmínek vytvořit nemohou. Malé shluky jsou poměrně časté na skalních stěnách, není proto cílem, aby byly podmínky změněny za účelem rozšíření těchto shluků o další body, které by s velkou pravděpodobností byly body vegetace.

Druhým extrémem ve velikosti shluků jsou ty největší z nich. Počet bodů se opět v různých variantách značně liší od pár desítek až k několika tisícům, v případě varianty 5 dokonce přes 43 000 bodů. Nejrozsáhlejší shluky tvoří ve většině případů terén a velmi věrně kopírují DMR 5G. V Českém Švýcarsku jsou shluky charakterizovány vysokou mírou homogenity, čili není zapotřebí algoritmus rozšiřovat o podmínku ukončení tvorby shluku například počtem bodů v segmentu. Tím by došlo jen k vytvoření několika menších shluků, při jejichž klasifikaci by spíše mohlo dojít častěji k chybám, protože některé z nich by nevykazovaly tak vysokou pravděpodobnost příslušnosti k terénu. Omezení počtu bodů ve shluku by výsledek nezlepšilo ani v Prachovských skalách, protože především ve druhé variantě jsou nastaveny přísné podmínky pro zařazení bodu do shluku, a největší vytvořený shluk má pouze 46, 35 nebo 121 bodů (v závislosti na datové sadě).

Z předcházejících odstavců vyplývá, že vypočtená statistika průměrná velikost shluku je značně ovlivněna právě množstvím jednobodových shluků i počtem bodů v největším shluku. Vypovídající je především v porovnání s ostatními variantami, kdy lze konstatovat, že například varianta 6 má průměrně o něco málo větší shluky než varianta 4. V tomto smyslu pak lze potvrdit fakt, že se zvyšujícími hodnotami parametrů roste průměrná velikost shluku, je tedy vytvářen menší počet rozsáhlejších segmentů.

Obě dvě modifikace základní podoby shlukovacího algoritmu, tedy zavedení průběžné aktualizace výpočtu Mahalanobisovy vzdálenosti a zařazení kritéria výšková odchylka, způsobily výrazný pokles v počtu bodů v největším shluku z původních 6 344 bodů na 407 a 118 (porovnání s variantou 2, ve které jsou jinak stejné hodnoty použitých parametrů). V obou

variantách tedy bylo podle očekávání vytvořeno více shluků, přičemž při aktualizaci MD podstatně více, což je způsobeno mimo jiné i značným nárůstem jednobodových segmentů.

Za účelem hodnocení segmentace byla vypočtena průměrná míra homogenity shluků, která ve všech případech (až na variantu 8) překročila hranici 99 %. Tato charakteristika je však značně ovlivněna množstvím jednobodových segmentů, proto byla vytvořena druhá statistika nazvaná kvalita segmentace, která je tohoto vlivu zbavena. Podle výsledků kvality segmentace lze jako nejvhodnější hodnotit variantu 4, tedy modifikaci základního shlukovacího algoritmu s využitím průběžné aktualizace výpočtu Mahalanobisovy vzdálenosti.

### Klasifikace

Následné rozšíření o tvorbu DMR proběhlo metodou podle Lysáka (2016). Ukázalo se však, že tato metoda není při klasifikaci shluků v některých lokalitách zcela spolehlivá. I přesto je ale dosaženo v Českém Švýcarsku DMR se střední kvadratickou chybou v rozmezí 4,22 – 5,03 m (srovnání s DMR 5G), resp. 3,93 – 5,03 m (srovnání s myDMR) v závislosti na zvolené variantě. Chyba RMSE vztažená k myDMR Holmana (2013) je nižší o 20-30 cm, než v případě srovnání s méně přesným DMR 5G, pouze u varianty 8 je chyba stejně velká. Na první pohled se může zdát chyba vysoká, ovšem testovaná lokalita je značně členitá a i jen malá změna rozlohy skalní plošiny způsobí velké výškové rozdíly. Navíc je třeba si uvědomit, že i v DMR 5G jsou generalizovaná místa, která reálnému prostředí příliš neodpovídají. Velmi dobrým výsledkem je, že přes 40 % území má výškový rozdíl pouze do 40 centimetrů.

Dolanský (2008) uvádí, že v DMR vytvořeném na TU v Drážďanech z dat velkoplošného leteckého laserového skenování v NP České Švýcarsko pořízených v rámci mezinárodního projektu GeNeSiS, je střední kvadratická chyba 16 cm a ve skalnatých oblastech až 4 m. Odchylka v členitých lokalitách zde vytvořených modelů je tedy minimálně o 1 m vyšší, ovšem skenování v mezinárodním projektu proběhlo v nižší výšce, a proto průměrná hustota bodů je 8 bodů/m<sup>2</sup> (Dolanský, Štronerová, 2012), což je podstatně více než v datech od ČÚZK, kde je hustota bodů pouze 1,7 bodu/m<sup>2</sup>. Je pravděpodobné, že při testování algoritmu na datech s vyšší hustotou neměřených bodů by bylo rovněž dosaženo výsledků s nižší chybou.

Střední kvadratická chyba DMR vytvořených v Prachovských skalách je podstatně větší, konkrétně v rozmezí 6,55 – 10,04 m. Chyba je způsobena velkým zastoupením vegetace v DMR, která je charakteristická totožnými odrazovými vlastnostmi s terénem. Výsledné DMR proto bohužel moc věrohodně realitu nepopisují. V tom je velký rozdíl ve srovnání právě s modely vytvořenými v Českém Švýcarsku, ve kterých jsou velké chyby kumulované převážně na okraje skalních plošin a vysoká vegetace je až na malé výjimky odstraněna, a z toho důvodu je charakter reliéfu okolí Pravčické brány velmi dobře patrný. Vysokou chybu RMSE mají i modely Prachovských skal z lokalit střed a Babinec vzniklé z dat z roku 2010, kde jsou již části lokalit vykácené. Příčinou velkých nepřesností je mimo jiné to, že bodové mračno Prachovských skal je řidší, protože je tvořeno pouze body z jednoho letového pásu, dalším důvodem je také nerovnoměrné rozložení bodů představující terén (podrobněji níže).

Při pohledu na výsledné DMR a rozdílové rastry, které byly vytvořeny ze shluků vytvořených jednou z modifikovaných variant shlukovacího algoritmu, je patrné, že modifikacemi byly odstraněny některé základní podobou algoritmu chybně vytvořené vyvýšeniny. Výstupy obou

dvou modifikací se vyznačují nižší RMSE i průměrným výškovým rozdílem. A i když nižší hodnoty obou dvou vypočtených statistik má varianta, která více zohledňuje výškový rozdíl mezi body, nelze říci, že by výsledný model lépe kopíroval povrch DMR 5G než model vzniklý druhou modifikací. Právě varianta s průběžnou aktualizací MD se totiž vyznačuje ne tak velkými rozdíly od DMR 5G.

Pokud se znovu podíváme na histogramy kritéria C (obr. 31), u kterých je dán předpoklad, že druhý z vrcholů bimodálního rozložení bodů L odpovídá histogramu bodů V, a první normální rozdělení představuje body terénu (G), pak lze zjistit, že všechny datové sady mají řádově stejný počet terénních bodů. České Švýcarsko se však od Prachovských skal liší podstatně vyšším množstvím odrazů od vegetace. V průběhu klasifikace to znamená, že v lokalitách Babinec a střed mají body vyšší pravděpodobnost příslušnosti k terénu, což způsobuje, že mají poměrně vysokou pravděpodobnost i shluky, které by v případě většího rozdílu podílu bodů V a G odpovídaly spíše vegetaci. Z toho důvodu pak nelze body, resp. shluky oddělit žádnými prahy.

Podle histogramů kritéria C se může zdát, že možnou příčinou poměrně špatných výsledných DMR Prachovských skal je nedostatek vegetace (v porovnání s Českým Švýcarskem), což ovšem není pravda. Nevýhodné je spíše její nerovnoměrné rozložení ve sledovaných lokalitách, resp. její úplná absence v některých místech, protože v těchto místech je pak pořízeno velké množství terénních bodů, jejichž hustota zdaleka neodpovídá hustotě terénních bodů na zbylém území, kde je skutečných terénních bodů naopak jen minimálně. Při výpočtu pravděpodobnosti příslušnosti však lokální proměnlivost krajinného pokryvu a rozložení hodnot kritéria C, a tím i různé parametry normálních rozdělení, nehrají žádnou roli. Nabízí se tedy otázka, zda by nebyla zlepšena kvalita výsledných DMR právě při lokálním výpočtu parametrů normálních rozdělení. I když se tak na první pohled zdát může, je třeba si uvědomit, že v této práci mají testované lokality (Prachovské skály) rozlohu jen  $660 \times 290 \text{ m}^2$  a  $240 \times 150 \text{ m}^2$ , čili řešením by muselo být i určení ideálně velkého plovoucího okna. Při volbě příliš malého okna je však pravděpodobné, že histogramy kritéria C nebudou bimodální, čímž by došlo v těchto místech k nesprávnému určení parametrů normálních rozdělení, a tím i chybné klasifikaci. Komplikací je pak určitě i fakt, že se parametry normálního rozdělení získávají v jiném softwaru, než v jakém probíhá celá analýza. Protože odpověď není jednoznačná, navrhuje se zabývat se problémem v dalších studiích.

### **Návrhy rozšíření**

V průběhu tvorby algoritmu bylo položeno několik otázek, na které není zcela jednoznačná odpověď, a proto budou tyto body v následujících odstavcích diskutovány. První otázka vznikla na samém počátku tvorby a řeší, jakým způsobem volit iniciální body. Možností jejich určení je několik. Iniciální body lze zvolit ručně, čili co shluk, to jeden či více iniciálních bodů. Tento způsob je ale nevýhodný z důvodu zdlouhavosti práce, a navíc pak celý algoritmus pozbývá výhody automatizace procesu. Druhou možností by mohla být volba iniciálních bodů pravidelně v prostoru. Ani tento způsob však není u dat LLS ideální (a principiálně už vůbec ne při použití vybrané segmentační metody), protože body jsou v prostoru rozmístěny nepravidelně. Z bodů by se tedy musel vytvořit DMR, a teprve z něj by se mohly vygenerovat body s pravidelným krokem. Nevýhodou je, že některými převody by byla ztracena původní přesnost dat. Pro

segmentační metodu *region growing* je tedy volba nových iniciálních bodů až po vytvoření předchozího segmentu v podstatě jediná možná. Otázkou je, zda by nebylo výhodnější, aby novým iniciálním bodem byl nejbližší neoznačený bod, nikoliv bod s nejnižším ID, i když je pravdou, že i přidělování ID vykazuje v prostoru jistou pravidelnost. Důvodem je fakt, že by shluky postupně zaplňovaly celou testovanou oblast z jednoho počátečního místa, čili by se souvisle rozšiřovala pomyslná plocha tvořená již segmentovanými body. Představou je, že by tímto způsobem byly vytvářeny shluky, které budou lokálně lépe kopírovat povrch.

Při hledání optimálních hodnot parametrů se zase zkoumalo, zda má být velikost  $d_z$  rovna  $d_s$ , nebo větší, nebo menší ( $d_z$  a  $d_s$  vysvětleny v kapitolách 4.1.2 a 4.1.4). Ukázalo se, že není až tak důležité, zda jsou hodnoty stejné či nikoliv, důležité však je, aby byly oba parametry vyšší než průměrná vzdálenost mezi body a aby byly hodnoty snižovány či zvyšovány současně, čili aby nedošlo k situaci, kdy bude jeden z parametrů podstatně vyšší než druhý. Toto tvrzení ostatně platí obecně pro hodnoty všech parametrů. Na základě mnoha vyzkoušených variant lze doporučit volit velikost okolí iniciálního bodu stejně velké nebo větší než je okolí, v němž jsou vyhledávány body při samotném rozrůstání shluku.

Problémem k hlubšímu prozkoumání je, kdy relativizovat hodnoty amplitudy a šířky odrazu. V základní podobě navrženého shlukovacího algoritmu jsou hodnoty amplitudy a šířky všech bodů v souboru převedeny na relativní na počátku celého procesu. Veličiny tedy nabývají hodnot v intervalu  $\langle 0; 1 \rangle$ . Převod je proveden z důvodu snadnější a přehlednější práce s hodnotami. Výhodou toho, že je znám konkrétní interval hodnot, se kterými se pracuje, je, že se lépe stanovují jednotlivé parametry. Jiného výsledku by bylo ale dosaženo, kdyby převod na relativní hodnoty probíhal pro každý shluk zvlášť. Výpočet by probíhal tak, že by byly převedeny nejprve hodnoty bodů vybraných do zárodku a následně by po přidání každého bodu do shluku došlo k přepočítání minimálních a maximálních hodnot, a tím pak i k novým relativním hodnotám. Ve druhém případě je základní myšlenkou snaha daný segment co nejvíce odlišit od zbytku bodového mračka. Dá se předpokládat, že by takový převod byl vhodnější při zkoumání prvků mikroreliefu.

Jiný návrh se vztahuje k vlastnosti, kdy se přesnost určení šířky mění v závislosti na velikosti amplitudy (Mücke, 2008). Ve shlukovacím procesu jsou z toho důvodu zavedeny dvě různé Mahalanobisovy vzdálenosti právě podle velikosti amplitudy. Přejít mezi nimi je ovšem ostrý, návrhem tedy je, aby byla za účelem odstranění tohoto přechodu vytvořena spojitá funkce, např. lineární. Dalším možným rozšířením této práce je testování klasifikace vytvořených shluků jinými klasifikačními metodami, zejména pak upravenou hierarchickou robustní interpolací. Poslední uvedenou možností rozšíření je úprava vytvořených skriptů s cílem optimalizovat celý proces, především však samotnou segmentaci, a dále tvorba uživatelského rozhraní v podobě toolboxu pro SW ArcGIS.

## 7 ZÁVĚR

Obecnými problémy nedostatečně přesného popisu skalních útvarů z dat LLS je v první řadě málo zaznamenaných odrazů od terénu kvůli lesnímu porostu, dále také podobné odrazivé vlastnosti skalních bloků s jehličnatými lesy nebo například nerovnoměrná hustota bodů způsobená vzájemnou polohou skeneru a skalních věží (Csaplovics, Kautz, a kol., 2001). Protože většina filtrovacích algoritmů pracuje na principu vyhlazování povrchu, jsou skalní věže v pískovcových městech buď odstraněny úplně, anebo se vyskytují pouze ve vyhlazené a neodpovídající podobě.

Jedním z cílů této práce bylo ověřit, zda mohou být doplňkové informace o pulsu využity v procesu zpracování dat LLS, v tomto případě tedy při segmentaci a klasifikaci. Již v několika předcházejících studiích (např. Mücke, 2008; Lysák, 2011) bylo potvrzeno, že amplituda a šířka odrazu samy o sobě nenesou žádnou informaci, na základě které by mohlo k filtraci dojít. Z toho se vycházelo i v této práci a doplňkové informace byly v procesu segmentace využity v kombinaci s geometrickými informacemi. Tímto způsobem byly vytvořeny shluky s průměrnou mírou homogenity přes 99 %. Následné rozšíření práce o klasifikaci shluků do tříd terén a vegetace bylo provedeno podle míry příslušnosti shluku k daným třídám, která je dána součtem měr příslušností jednotlivých bodů segmentu. Z bodů klasifikovaných jako terén pak byly vytvořeny DMR, jejichž střední kvadratická chyba je 4,22 – 5,03 m v Českém Švýcarsku a 6,55 – 10,04 m v Prachovských skalách. Na první pohled vysoká chyba RMSE je dána nízkou hustotou bodů klasifikovaných jako terén a také faktem, že území je velmi členité a i jen malá změna rozlohy skalních plošin způsobuje výškové rozdíly až v desítkách metrů. V případě modelů z Prachovských skal je vysoká chyba způsobena i přítomností velkého množství vegetace, která použitou klasifikační metodou nelze odstranit. RMSE 4 – 5 m je však považována za velmi dobrý výsledek, protože i v DMR vytvořeného na TUD je chyba ve skalnatých oblastech až 4 m.

Lze tedy konstatovat, že experimentálním ověřením na reálných datech byl splněn primární cíl (a i dílčí související), čili že využitím geometrických informací v kombinaci s doplňkovými je dosaženo spolehlivého výsledku i bez použití manuální klasifikace. To ovšem platí pouze v lokalitách, kde jsou rovnoměrně rozložené body terénu i vegetace, naopak v místech velmi husté vegetace, kde odrazy od povrchu téměř chybí, vznikají chyby v řádech metrů. Na rozdíl od již

existujících filtračních/klasifikačních algoritmů popsaných v kapitole 2 nevzniká touto metodou model s tak vyhlazenými skalními útvary, a na několika místech model dokonce odpovídá realitě lépe než DMR 5G, který prošel manuální kontrolou. Protože byla ke klasifikaci použita metoda, která není zcela spolehlivá, je navrženo, aby výsledek segmentačního algoritmu byl použit jako vstup do upravené hierarchické robustní interpolace.

V současné době neexistuje algoritmus, kterým by byl vytvořen DMR, jež by realitu popisoval spolehlivě v každém bodě, i často používaná hierarchická robustní interpolace (Pfeifer, Stadler, Brieše, 2001) podává spolehlivé výsledky pouze v místech s pozvolna se měnící krajinou. Celá oblast laserového skenování je stále ve vývoji, a kromě vytvoření algoritmu, který by na rozdíl od současných algoritmů nebyl založen pouze na vyhlazování povrchu, je třeba najít způsob, jak se vyrovnat s omezujícími faktory spolehlivosti výsledných modelů již při samotném laserovém skenování, např. s vlivy prostředí (vlhkost, propustnost). Právě v ohledu tvorby filtračních/klasifikačních algoritmů má segmentace a využití doplňkových informací o pulsu, jež jsou základem zde navržené metody, velký potenciál.

## POUŽITÉ ZDROJE

- AXELSSON, P. (1999): *Processing of laser scanner data—algorithms and applications*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54, s. 168 – 147
- BERALDIN, J. – A., BLAIS, F., LOHR, U. (2010): *Laser scanning technology*. In: Vosselmann, G., Maas, H.-G.: Airborne and terrestrial laser scanning. Dunbeath, Scotland: Whittles Pub., 318 s.
- BRIESE, CH. (2010): *Extraction of digital terrain models*. In: Vosselmann, G., Maas, H.-G.: Airborne and terrestrial laser scanning. Dunbeath, Scotland: Whittles Pub., 318 s.
- BRIESE, CH., PFEIFER, N., DORNINGER, P. (2002): *Applications of the robust interpolation for DTM determination*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 34, s. 55 – 61
- COMANICIU, D., MEER, P. (2002): *Mean shift: a robust approach toward feature space analysis*. IEEE Pattern Analysis and Machine, 24 (5), s. 603 – 619
- CSAPLOVICS, E., KAUTZ, A., TROMMLER, M., WAGENKNECHT, S. (2001): *Spatial Information Systems for National Park Regions in the Central European Space (CES) – Remote Sensing and GIS for Monitoring and Management*. Dostupné z URL: <http://www.geo.info.hu/sat/cd/pdf/Csaplovics&Co/Space%20&%20Time%202001-%20NPIS.pdf> (cit. 23. 1. 2016)
- ČÚZK (2016): *Prohlížečí služba WMS ZM 10*. Dostupné z URL: [http://geoportal.cuzk.cz/WMS\\_ZM10\\_PUB/WMSservice.aspx](http://geoportal.cuzk.cz/WMS_ZM10_PUB/WMSservice.aspx) (cit. 19. 1. 2016)
- DOLANSKÝ, T. (2004): *Lidary a letecké laserové skenování*. Acta universitatis Purkynianae, 99, 100 s. Dostupné z URL: <http://wvc.pf.jcu.cz/ki/data/files/160lidaryweb.pdf> (cit. 23. 6. 2015)
- DOLANSKÝ, T. (2008): *Porovnání přesnosti DMT z laserového skenování s pozemními měřeními*. GIS Ostrava 2008, dostupné z URL: [http://gis.vsb.cz/GIS\\_Ostrava/GIS\\_Ova\\_2008/sbornik/Lists/Papers/026.pdf](http://gis.vsb.cz/GIS_Ostrava/GIS_Ova_2008/sbornik/Lists/Papers/026.pdf) (cit. 29. 6. 2016)
- DOLANSKÝ, T., ŠTRONEROVÁ, J. (2012): *Laserové skenování v Českém Švýcarsku*. Dostupné z URL: [http://projekty.fzp.ujep.cz/transeconet/documents/laserove\\_skenovani.pdf](http://projekty.fzp.ujep.cz/transeconet/documents/laserove_skenovani.pdf) (cit. 29. 6. 2016)



- DONEUS, M., BRIESE, CH. (2006): *Digital terrain modelling for archaeological interpretation within forested areas using full-waveform laserscanning*. The 7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage, s. 155 – 162
- DUŠÁNEK, P. (2014): *Nové výškopisné mapování České republiky*. GIS Ostrava 2014, dostupné z URL:  
[http://gis.vsb.cz/GIS\\_Ostrava/GIS\\_Ova\\_2014/sbornik/papers/gis2014526faa8a434ef.pdf](http://gis.vsb.cz/GIS_Ostrava/GIS_Ova_2014/sbornik/papers/gis2014526faa8a434ef.pdf)  
(cit. 14. 4. 2016)
- ENŤLE, F., HEINZEL, J., KOCH, B. (2014): *Accuracy of vegetation height and terrain elevation derived from ICESat/GLAS in forested areas*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 31, s. 37 – 44
- FIC, M. (2009-2016): *Prachovské skály / Český ráj*. In: iTRAS: to nej z české krajiny. Dostupné z URL: <http://itras.cz/prachovske-skaly/galerie/15655/> (cit. 2. 4. 2016)
- FILIN, S. (2002): *Surface clustering from airborne laser scanning data*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 34, 117 – 124
- FILIN, S., PFEIFER, N. (2006): *Segmentation of airborne laser scanning data using a slope adaptive neighborhood*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 60, s. 71–80
- FLOOD, M. (2001): *Lidar activities and research priorities in the commercial sector*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 34, s. 3 – 7
- HOJEROVÁ, H., JOHN, J., KOCINA, J., KOVÁŘ, D., PTÁK, M., VONDROVSKÝ, V. (2014): *Nový nález militárie a terénních reliktů souvisejících se zaniklou tvrzí Trojaň (okr. Český Krumlov)*. Dostupné z URL:  
[https://www.researchgate.net/profile/Vaclav\\_Vondrovsky/publication/289730055\\_Novy\\_nalez\\_militarie\\_a\\_terennich\\_reliktu\\_souvisejicich\\_se\\_zaniklou\\_tvrzi\\_Trojan\\_okr\\_Cesky\\_Krumlov/links/5692543208ae0f920dcd5a94.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Vaclav_Vondrovsky/publication/289730055_Novy_nalez_militarie_a_terennich_reliktu_souvisejicich_se_zaniklou_tvrzi_Trojan_okr_Cesky_Krumlov/links/5692543208ae0f920dcd5a94.pdf) (cit. 1. 7. 2016)
- HOLMAN, L. (2013): *Zpřesnění DMR v písčkovcovém skalním terénu s využitím registrace dat leteckého laserového skenování*. Diplomová práce. Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie PřF UK, Praha, 83 s.
- HUG, C., ULLRICH, A., GRIMM, A. (200-?): *Litemapper-5600 – a waveform-digitizing lidar terrain and vegetation mapping system*. Dostupné z URL:  
[http://www.riegl.com/uploads/tx\\_pxpriegldownloads/litemapper\\_Paper\\_.pdf](http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/litemapper_Paper_.pdf)  
(cit. 13. 2. 2016)
- KASHANI, A., G., OLSEN, M., J., PARRISH, CH., E., WILSON, N. (2015): *A Review of LIDAR Radiometric Processing: From Ad Hoc Intensity Correction to Rigorous Radiometric Calibration*. Sensors 2015, 15, s. 28099-28128.
- KRAUS, K., PFEIFER, N. (1998): *Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 53, s. 193 – 203
- LAND MANAGEMENT (2011): *Metoda Laserové skenování*. Praha. Dostupné z URL:  
<http://www.la-ma.cz/?p=88> (cit. 10. 11. 2015)
- LINDENBERGER, J. (1993): *Laser-Profilmessungen zur topographischen Geländeaufnahme*. Ph.D. thesis. Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Stuttgart,

- München, 131 s. Ke stažení z URL: <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2006/2712/> (cit. 23. 10. 2015)
- LYSÁK, J. (2011): *Filtrace dat leteckého laserového skenování v pískovcových skalních městech*. Seminární práce. Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie PřF UK, Praha, 27 s.
- LYSÁK, J. (2016): *Topografické mapování skalních útvarů s využitím dat leteckého laserového skenování*. Dizertační práce. Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie PřF UK, Praha, 248 s.
- DE MAESSCHALCK, R., JOUAN-RIMBAUD, D., MASSART, D., L. (2000): *The Mahalanobis distance*. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. 50, s. 1 – 18
- MALLET, C. (2009): *Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64, s. 1 – 16
- MANDLBURGER, G., BRIESE, CH., PFEIFER, N. (2007): *Progress in lidar sensor technology – chance and challenge for DTM generation and data administration*. Proceedings of the 51th Photogrammetric Week, s. 159 – 169. Dostupné z URL: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo07/200Mandlbürger.pdf> (cit. 22. 10. 2015)
- MÜCKE, W. (2008): *Analysis of full-waveform airborne laser scanning data for the improvement of DTM generation*. Diplomová práce. Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien, Vídeň, 67 s.
- NÁRODNÍ PARK ČESKÉ ŠVÝCARSKO (200-?): *Geologie*. Dostupné z URL: <http://www.npcs.cz/geologie> (cit. 19. 1. 2016)
- PAVELKA, K. (2013): *Letecké laserové skenování v ČR a možnosti využití dat pro dokumentaci historické těžby nerostných surovin*. 20 s.
- PETRIE, G., TOTH, Ch., K. (2009): *Terrestrial Laser Scanners*. In: Shan, J., Toth, Ch., K.: Topographic laser ranging and processing. CRC Press a Taylor & Francis Group, Boca Raton, 593 s.
- PFEIFER, N., MANDLBURGER, G. (2009): *LiDAR data filtering and DTM generation*. In: Shan, J., Toth, Ch., K.: Topographic laser ranging and processing. CRC Press a Taylor & Francis Group, Boca Raton, 593 s.
- PFEIFER, N., STADLER, P., BRIESE, CH. (2001): *Derivation of digital terrain models in the SCOP++ environment*. OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Digital Elevation Models, Stockholm, 13 s.
- PRAŽÁK, J. (1994): *Prachovské skály*. In: ČGS: Geologické lokality. Dostupné z URL: <http://lokality.geology.cz/71> (cit. 2. 4. 2016)
- PSM (2003-2011): *Prachovské skály*. Dostupné z URL: <http://www.skalnimesto.cz/prachovske.html> (cit. 2. 4. 2016)
- RAPIDLASSO (2012): *Rapidlasso GmbH: fast tools to catch reality*. Gilching. Ke stažení z URL: <http://rapidlasso.com/> (cit. 12. 11. 2015)

- DI SALVO, F., LO BRUTTO, M. (2014): *Full-Waveform Terrestrial Laser Scanning for Extracting a High-Resolution 3D Topographic Model: a Case Study on an Area of Archaeological Significance*. European Journal of Remote Sensing, 47, s. 307 – 327
- SANZ SUBIRANA, J., JUAN ZORNOZA, J., M., HERNÁNDEZ-PAJAREZ, M. (2011): *Multipath*. In: European Space Agency: Navipedia. Dostupné z URL: <http://www.navipedia.net/index.php/Multipath> (cit. 24. 1. 2016)
- SEEPERSAD, G. (2014): *Pseudorange and carrier phase multipath and noise*. Dostupné z URL: <http://garrett.seepersad.org/secondary/pseudorange-multipath-and-noise> (cit. 24. 1. 2016)
- SHAN, J., TOTH, CH., K. (2009): *Topographic laser ranging and processing*. CRC Press a Taylor & Francis Group, Boca Raton, 593 s.
- SITHOLE, G., VOSELMANN, G. (2004): *Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 59, s. 85 – 101
- SITHOLE, G., VOSELMANN, G. (2005): *Filtering of airborne laser scanner data based on segmented point clouds*. ISPRS – Workshop „Laser scanning 2005“, s. 66 – 71
- SOHN, G., DOWMAN, I. (2002): *Terrain surface reconstruction by the use of tetrahedron model with the MDL criterion*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 34, s. 336 – 344.
- SPRÁVA NP ČESKÉ ŠVÝCARSKO (200-?): *Plán péče o národní přírodní památku Pravčická brána na období 1. 1. 2005 – 31. 12. 2014*. Ke stažení na URL: [http://www.npcs.cz/sites/default/files/user\\_files/FTP\\_NO/Plany\\_pece/Plan\\_pece\\_NPR\\_Pravcicka.pdf](http://www.npcs.cz/sites/default/files/user_files/FTP_NO/Plany_pece/Plan_pece_NPR_Pravcicka.pdf) (cit. 21. 1. 2016)
- TÓVÁRI, D., PFEIFER, N. (2005): *Segmentation based robust interpolation – a new approach to laser data filtering*. ISPRS – Workshop „Laser scanning 2005“, s. 79 – 84
- VOSELMAN, G. (2000): *Slope based filtering of laser altimetry data*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 33, s. 935 – 942
- VOSELMAN, G., GORTE, B., G., H., SITHOLE, G., RABBANI, T. (2004): *Recognising structure in laser scanner point clouds*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36 (Part 8/W2), s. 33 – 38
- WILDOVÁ, V. (2013): *Lýkožrout prozatím kapituloval (5plus2)*. In: Silvarium.cz. Dostupné z URL: <http://www.silvarium.cz/zpravy-z-oboru-lesnictvi-a-drevarstvi/lykozrout-prozatim-kapituloval-5plus2> (cit. 2. 4. 2016)
- XU, S., VOSELMAN, G., OUDE ELBERINK, S. (2014): *Multiple-entity based classification of airborne laser scanning data in urban areas*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 88, s. 1 – 15
- ZÚ, VGHMŮŘ (2012): *Technická zpráva k digitálnímu modelu reliéfu 4. generace (DMR 4G)*. Dostupné z URL: [http://geoportal.cuzk.cz/Dokumenty/TECHNICKA\\_ZPRAVA\\_DMR\\_4G\\_15012012.pdf](http://geoportal.cuzk.cz/Dokumenty/TECHNICKA_ZPRAVA_DMR_4G_15012012.pdf) (cit. 14. 4. 2016)

- ZÚ, VGHMÚř (2015a): *Technická zpráva k digitálnímu modelu reliéfu 5. generace (DMR 5G)*.  
Dostupné z URL: [http://geoportal.cuzk.cz/Dokumenty/TECHNICKA\\_ZPRAVA\\_DMR\\_5G.pdf](http://geoportal.cuzk.cz/Dokumenty/TECHNICKA_ZPRAVA_DMR_5G.pdf)  
(cit. 14. 4. 2016)
- ZÚ, VGHMÚř (2015b): *Technická zpráva k digitálnímu modelu povrchu 1. generace (DMP 1G)*.  
Dostupné z URL: [http://geoportal.cuzk.cz/Dokumenty/TECHNICKA\\_ZPRAVA\\_DMP\\_1G.pdf](http://geoportal.cuzk.cz/Dokumenty/TECHNICKA_ZPRAVA_DMP_1G.pdf)  
(cit. 14. 4. 2016)

## **SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1: Přehled použitých skriptů.....	77
Příloha 2: Vytvořené DMR.....	79
Příloha 3: Obsah přiloženého DVD .....	95

## **Příloha 1: Přehled použitých skriptů**

Všechny uvedené skripty se nachází na přiloženém DVD ve složce skripty. Jejich číslování odpovídá pořadí, v jakém jsou použity v průběhu segmentace a klasifikace. Písmena *a*, *b*, *c*, *d* poukazují na různé varianty téhož procesu.

### **1\_computeC.py**

- *vstup*: bodová vrstva – neklasifikované bodové mračno s FWF informacemi
- *funkce*: pro každý bod se vypočítá charakteristika C (uloženo jako nový atribut C), potřebné pro klasifikaci segmentů
- *výstup*: bodová vrstva bodového mračna s vypočtenou charakteristikou C

### **2\_prepare.py**

- *vstup*: bodová vrstva bodového mračna s vypočtenou charakteristikou C (výstup předchozího skriptu)
- *funkce*: příprava vstupu pro výpočet v SW R – body se rozdělí na body posledních odrazů (L) a ostatních odrazů (V)
- *výstup*: bodová vrstva posledních odrazů (L), bodová vrstva ostatních odrazů (V)

→ následuje ruční exportování atributové tabulky do formátu txt, poté probíhá práce ve statistickém softwaru R, kde jsou pro každé území získány parametry normálního rozdělení  $\mu$  a  $\sigma$  – zvlášť pro body představující vegetaci a zvlášť pro body terénu, které jsou získány z bodů L

### **3a\_regionGrowing.py**

- *vstup*: bodová vrstva posledních odrazů s FWF informacemi (jeden z výstupů předchozího skriptu)
- *funkce*: na vstupní vrstvě se provede segmentace bodového mračna, každému bodu se přiřadí ID shluku, ke kterému náleží (uloženo jako nový atribut CLUSTER)
- *výstup*: bodová vrstva segmentovaného bodového mračna

### **3b\_regionGrowing\_MD.py**

- *vstup*: bodová vrstva posledních odrazů s FWF informacemi (jeden z výstupů předchozího skriptu)
- *funkce*: na vstupní vrstvě se provede segmentace bodového mračna, každému bodu se přiřadí ID shluku, ke kterému náleží (uloženo jako nový atribut CLUSTER), při rozrůstání shluku se po přidání každého bodu přepočítají matice pro výpočet Mahalanobisovy vzdálenosti
- *výstup*: bodová vrstva segmentovaného bodového mračna

### **3c\_regionGrowing\_high.py**

- *vstup*: bodová vrstva posledních odrazů s FWF informacemi (jeden z výstupů předchozího skriptu)

- *funkce*: na vstupní vrstvě se provede segmentace bodového mračka, každému bodu se přiřadí ID shluku, ke kterému náleží (uloženo jako nový atribut `CLUSTER`), zaveden atribut výšková odchylka
- *výstup*: bodová vrstva segmentovaného bodového mračka

#### **4\_computePoint.py**

- *vstup*: bodová vrstva segmentovaného bodového mračka posledních odrazů s vypočtenou charakteristikou C (jeden z výstupů přechozího skriptu)
- *funkce*: provede výpočet pravděpodobnosti příslušnosti bodu k vegetaci a terénu (pravděpodobnosti bodu uloženy jako nové atributy `p_g`, `p_v`)
- *výstup*: bodová vrstva segmentovaného bodového mračka s vypočtenými pravděpodobnostmi příslušnosti k vegetaci a terénu

#### **5\_classifySegment.py**

- *vstup*: bodová vrstva segmentovaného bodového mračka s vypočtenými pravděpodobnostmi příslušnosti k vegetaci a terénu (výstup přechozího skriptu)
- *funkce*: shluk je klasifikován jako ta třída, ke které má shluk větší pravděpodobnost příslušnosti (klasifikace shluku uložena jako nový atribut `CLASS_CLUSTER`)
- *výstup*: bodová vrstva klasifikovaného bodového mračka

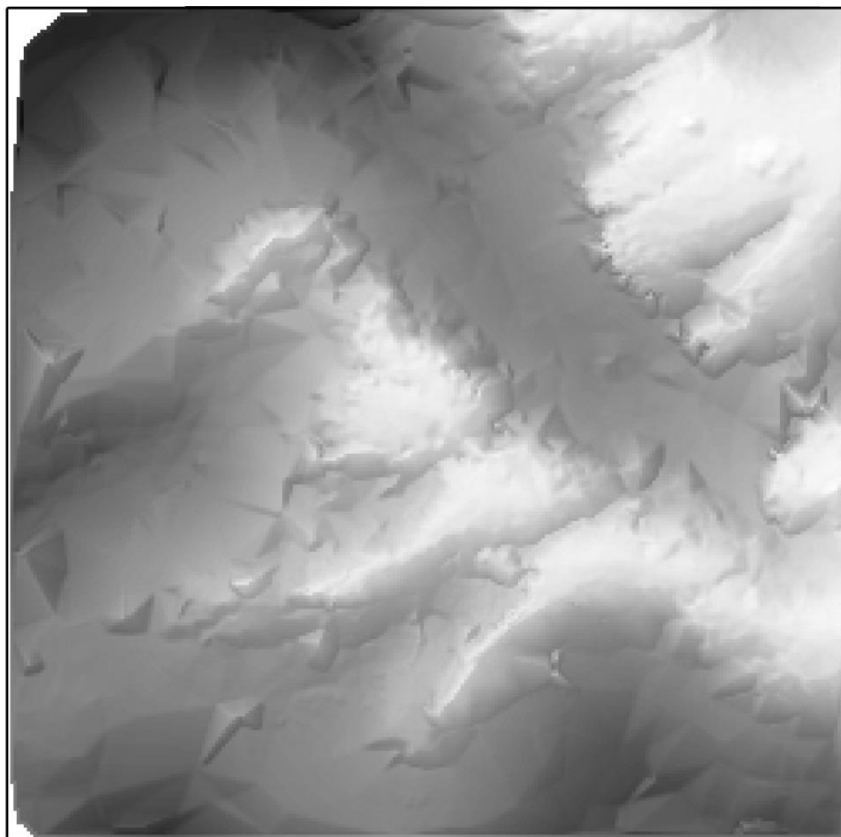


## Příloha 2: Vytvořené DMR

Vytvořené DMR pro testovaná zájmová území v rastrovém formátu se nachází na přiloženém DVD ve složce DMR.

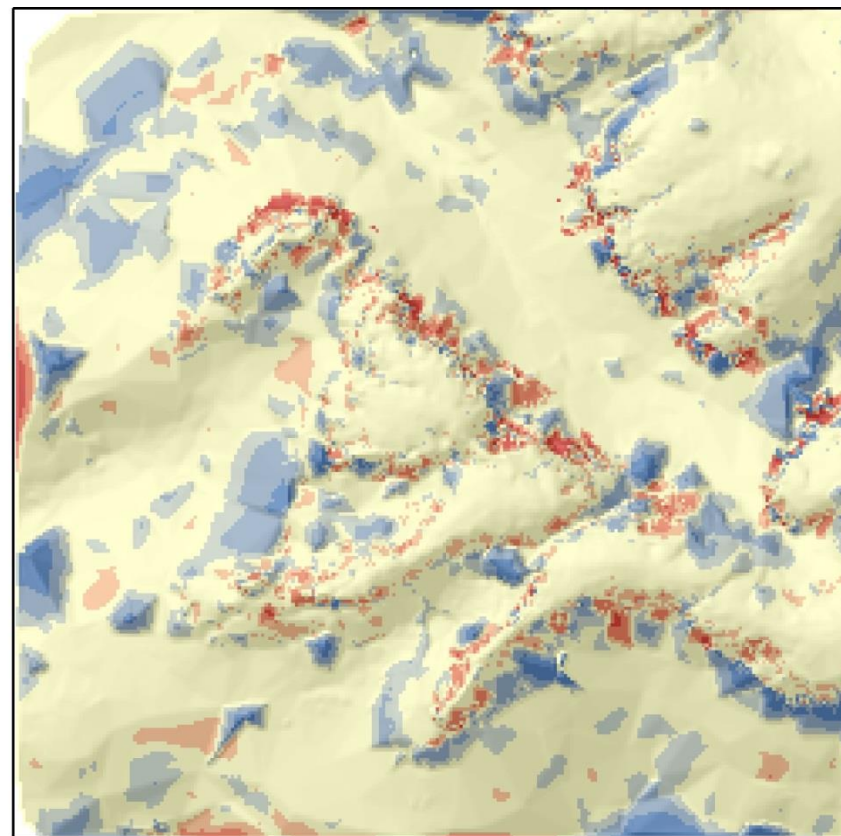
### České Švýcarsko – varianta 1

Vytvořený DMR

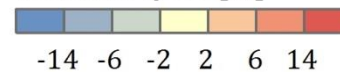


0 100 m

Rozdíl vytvořeného DMR s DMR 5G



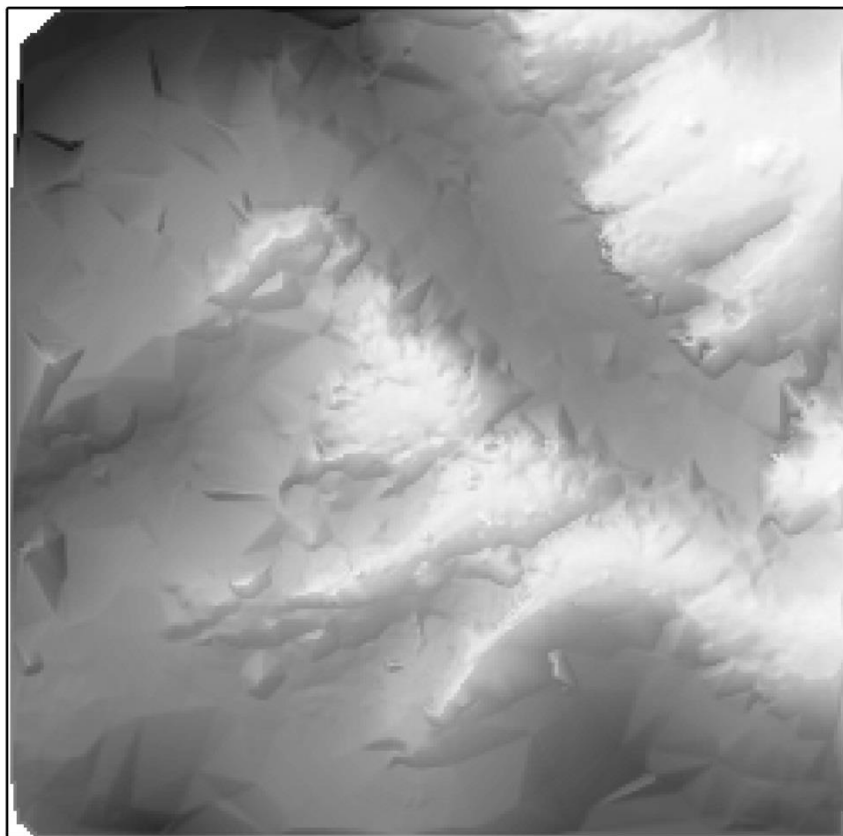
rozdíl ve výšce [m]



min -48,06 m  
max 43,46 m

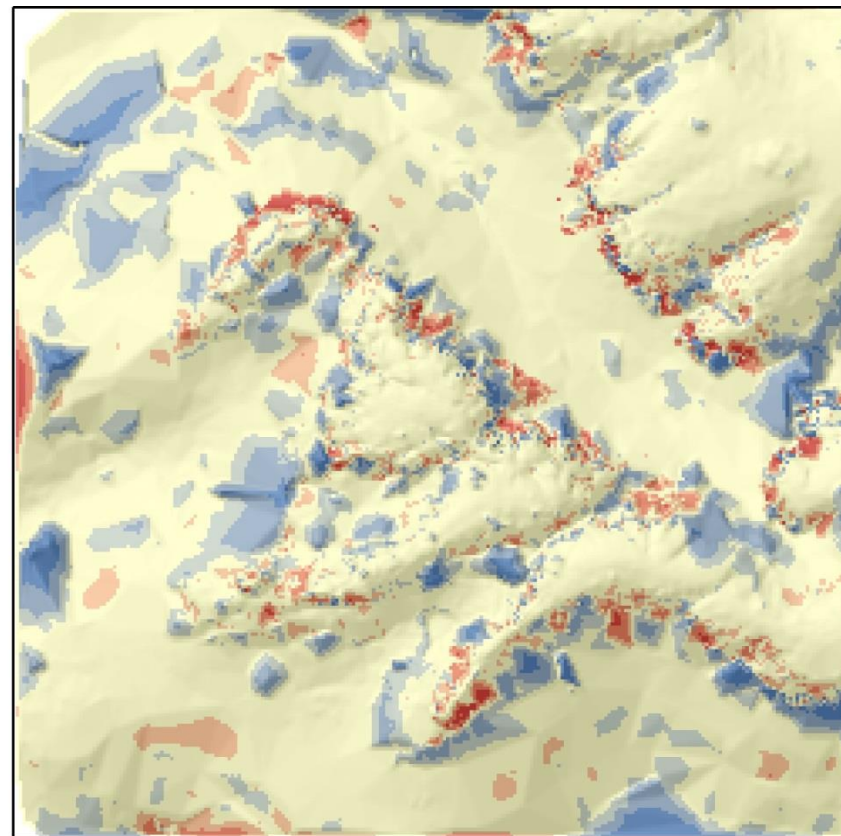
## České Švýcarsko – varianta 2

Vytvořený DMR

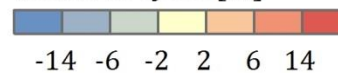


0 100 m

Rozdíl vytvořeného DMR s DMR 5G



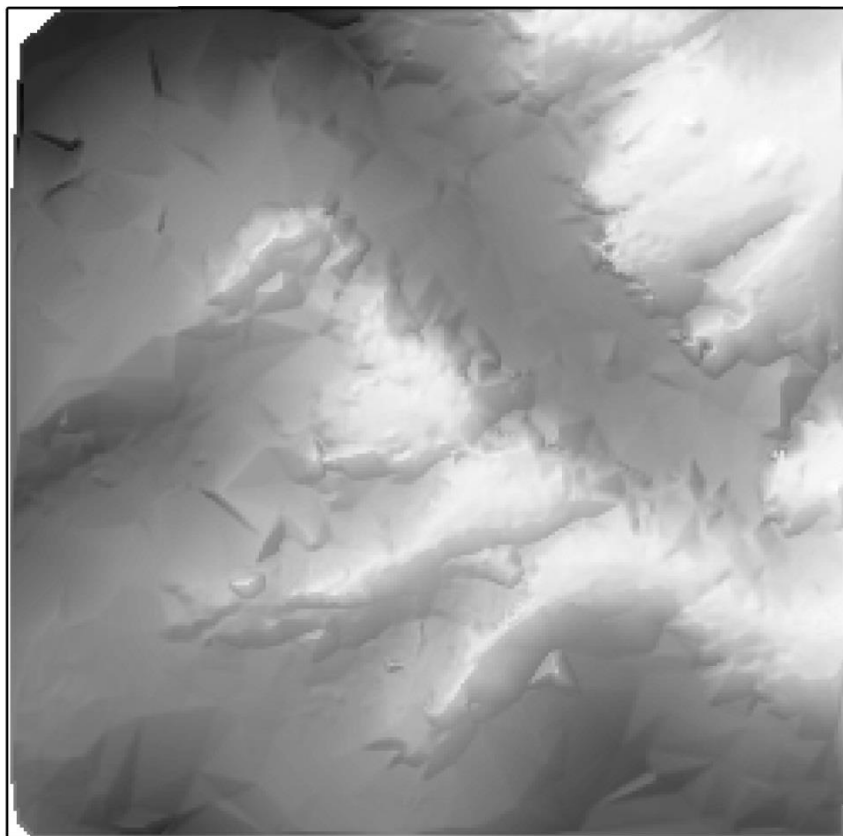
rozdíl ve výšce [m]



min -35,18 m  
max 53,70 m

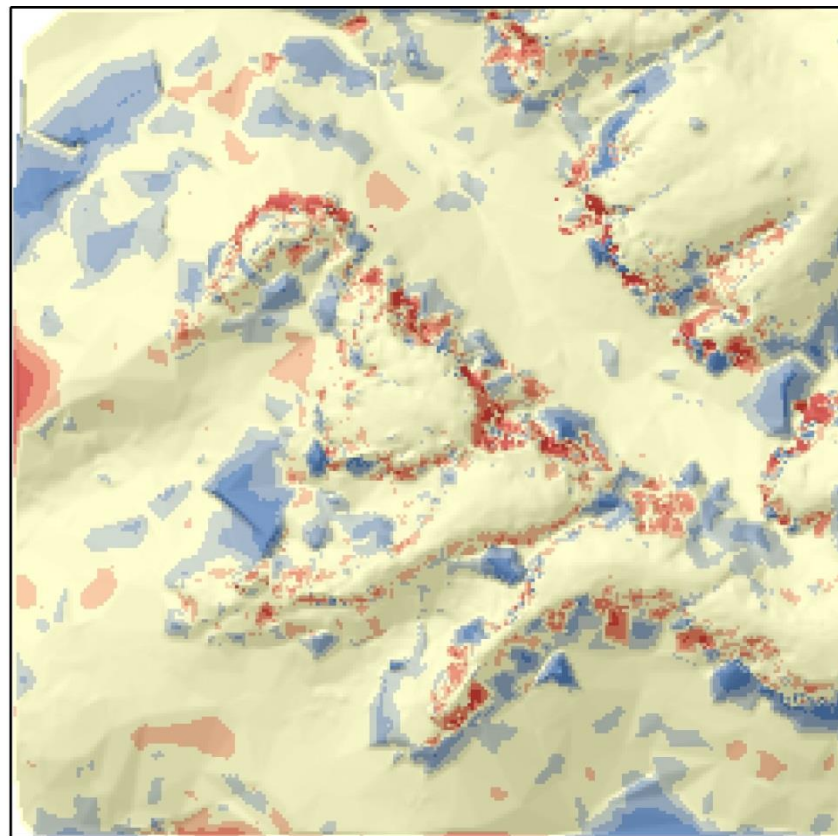
### České Švýcarsko – varianta 3

Vytvořený DMR

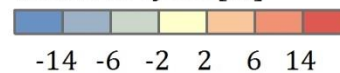


0 100 m

Rozdíl vytvořeného DMR s DMR 5G



rozdíl ve výšce [m]

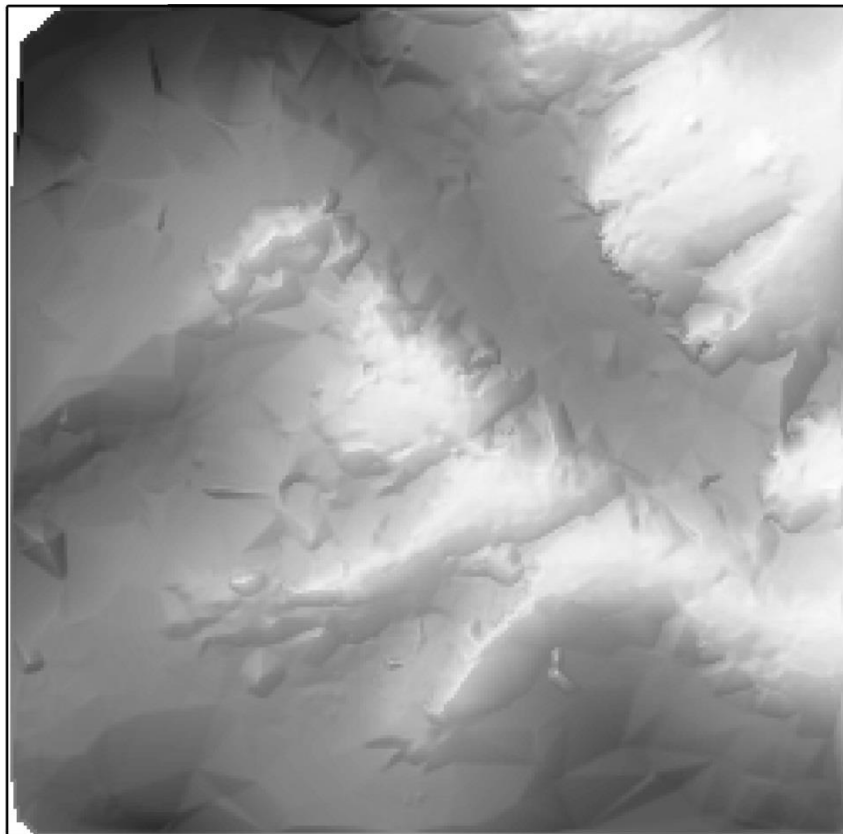


min -54,13 m  
max 53,71 m



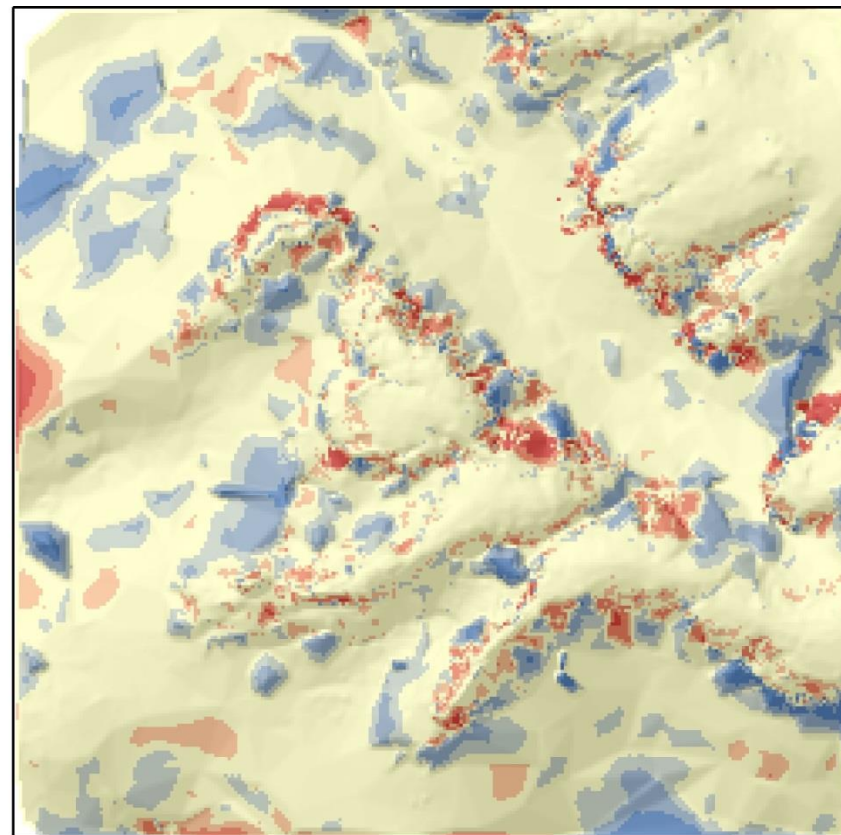
### České Švýcarsko – varianta 4

Vytvořený DMR

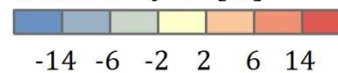


0 100 m

Rozdíl vytvořeného DMR s DMR 5G



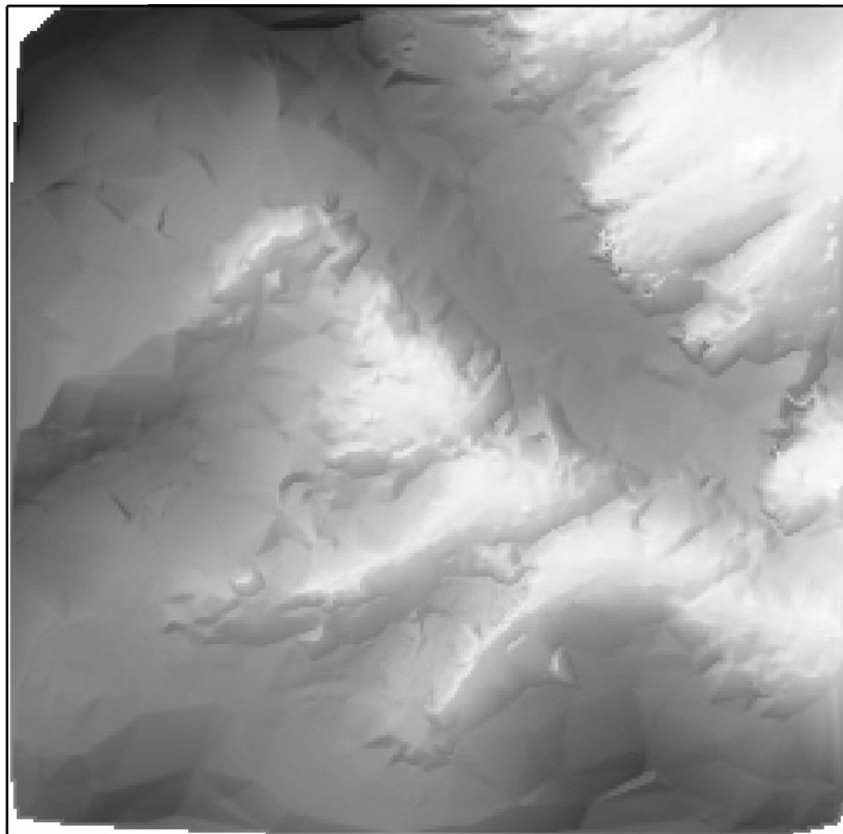
rozdíl ve výšce [m]



min -51,35 m  
max 42,91 m

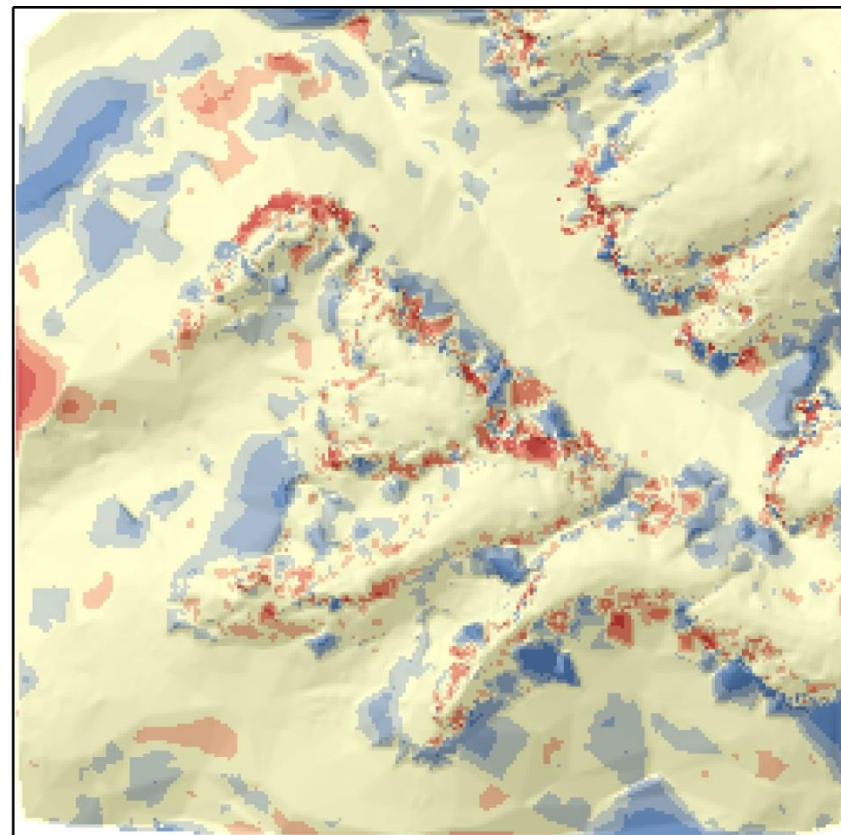
## České Švýcarsko – varianta 5

Vytvořený DMR

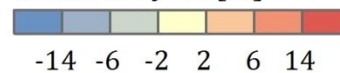


0 100 m

Rozdíl vytvořeného DMR s DMR 5G



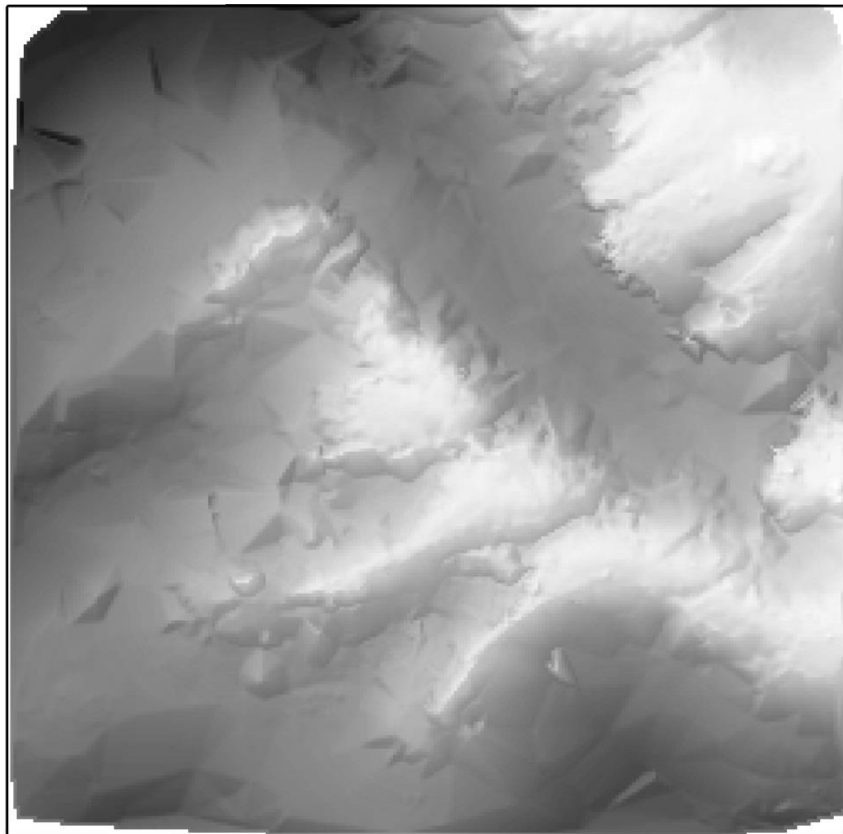
rozdíl ve výšce [m]



min -48,24 m  
max 40,12 m

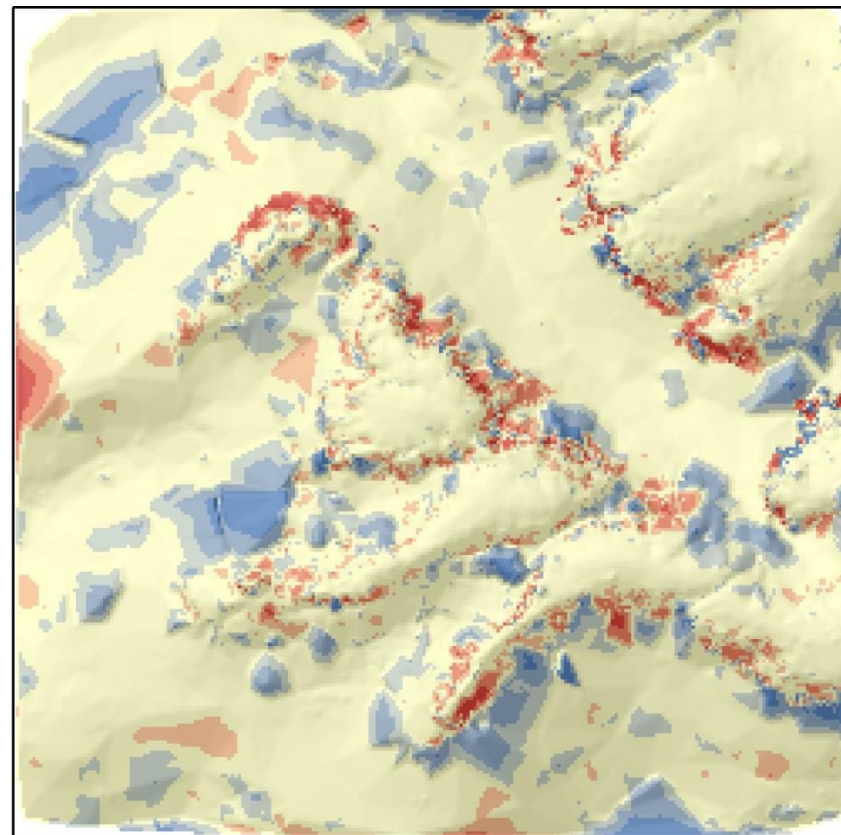
## České Švýcarsko – varianta 6

Vytvořený DMR

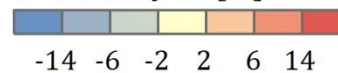


0 100 m

Rozdíl vytvořeného DMR s DMR 5G



rozdíl ve výšce [m]

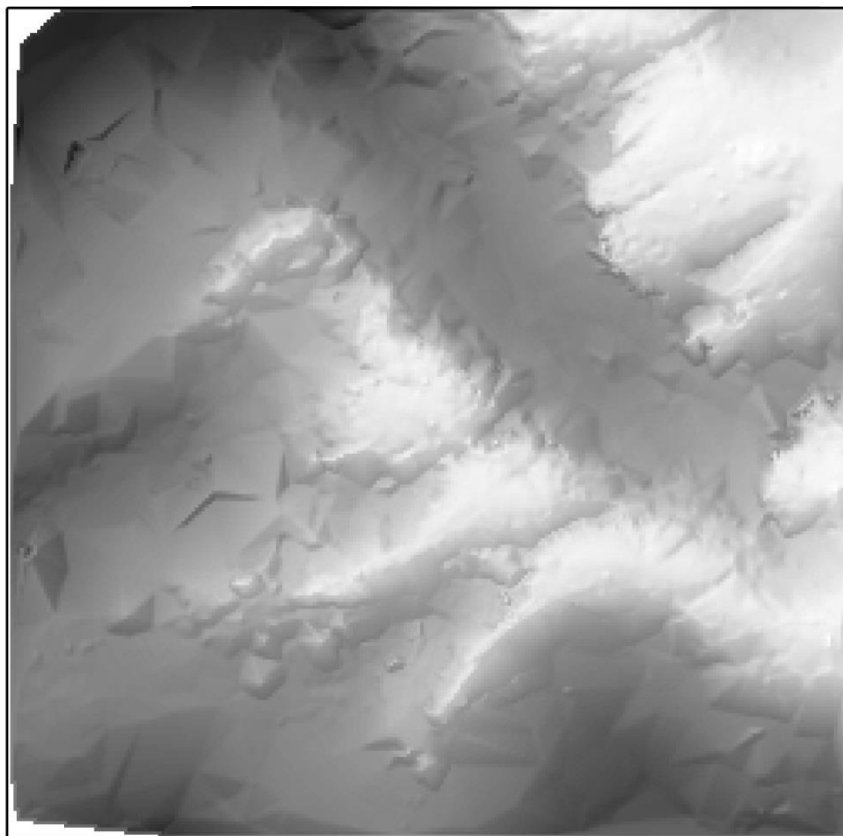


min -52,25 m  
max 45,75 m



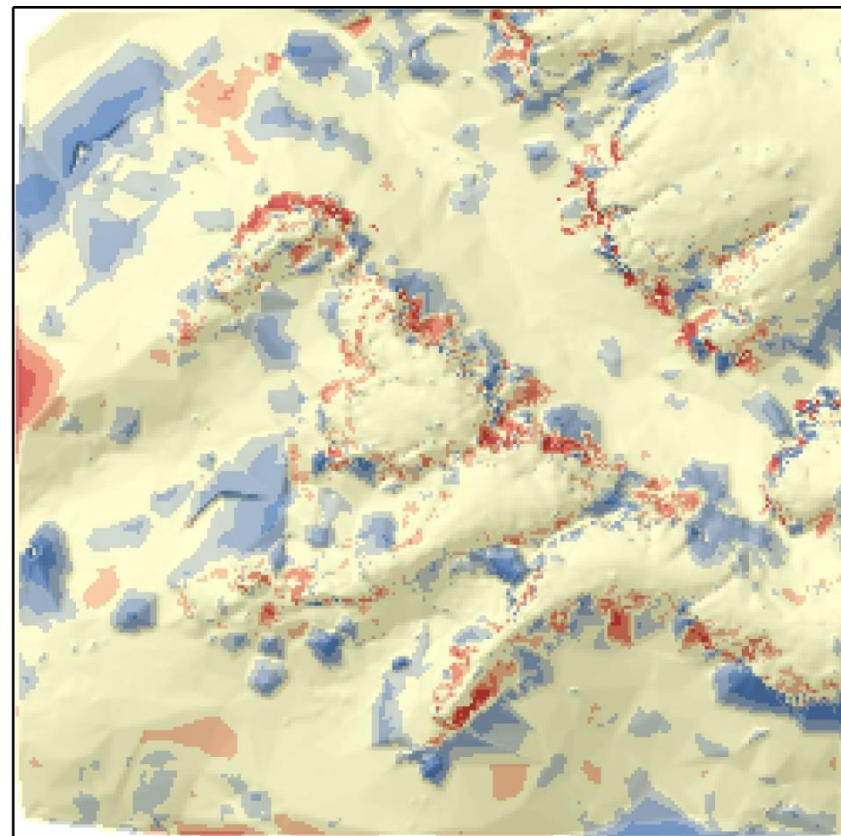
## České Švýcarsko – varianta 7

Vytvořený DMR

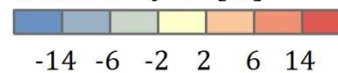


0 100 m

Rozdíl vytvořeného DMR s DMR 5G



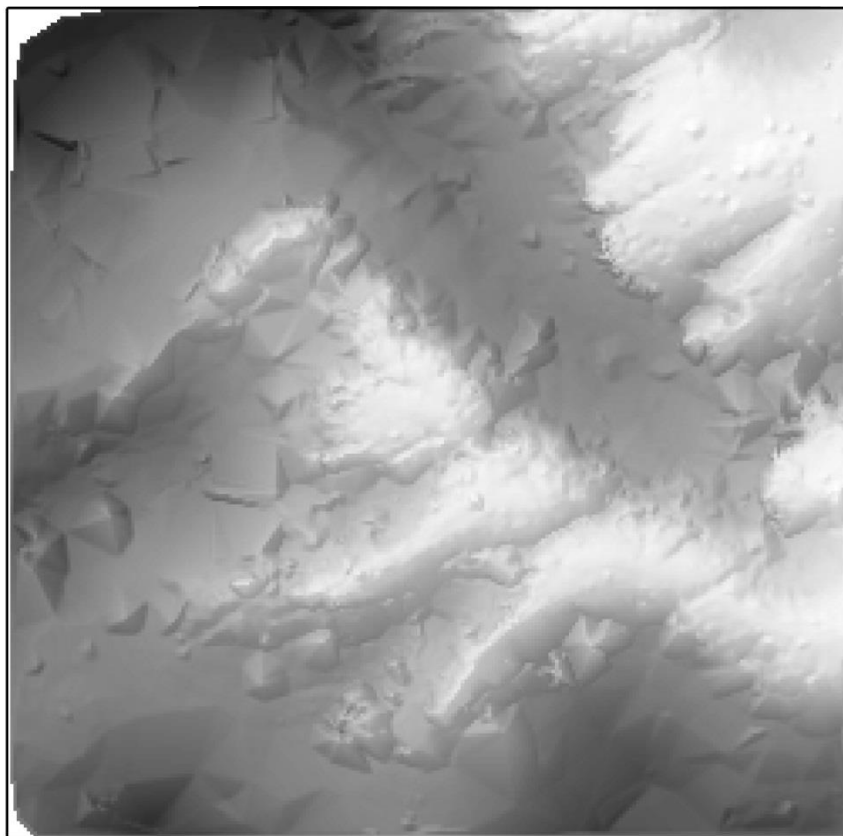
rozdíl ve výšce [m]



min -46,86 m  
max 43,40 m

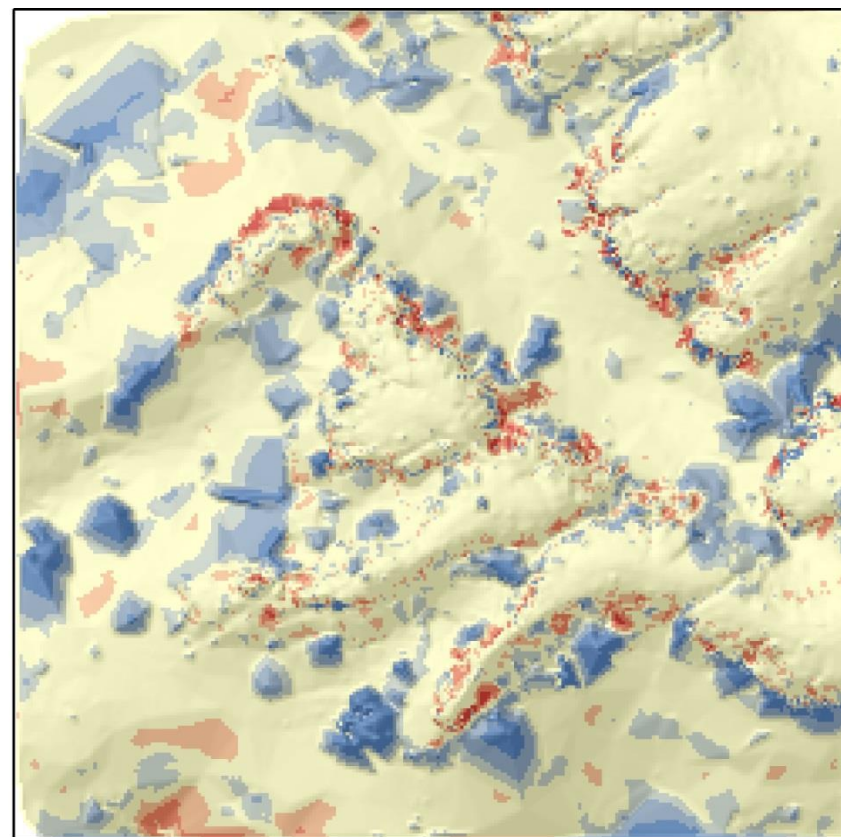
## České Švýcarsko – varianta 8

Vytvořený DMR

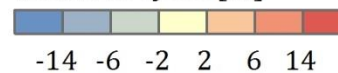


0 100 m

Rozdíl vytvořeného DMR s DMR 5G



rozdíl ve výšce [m]

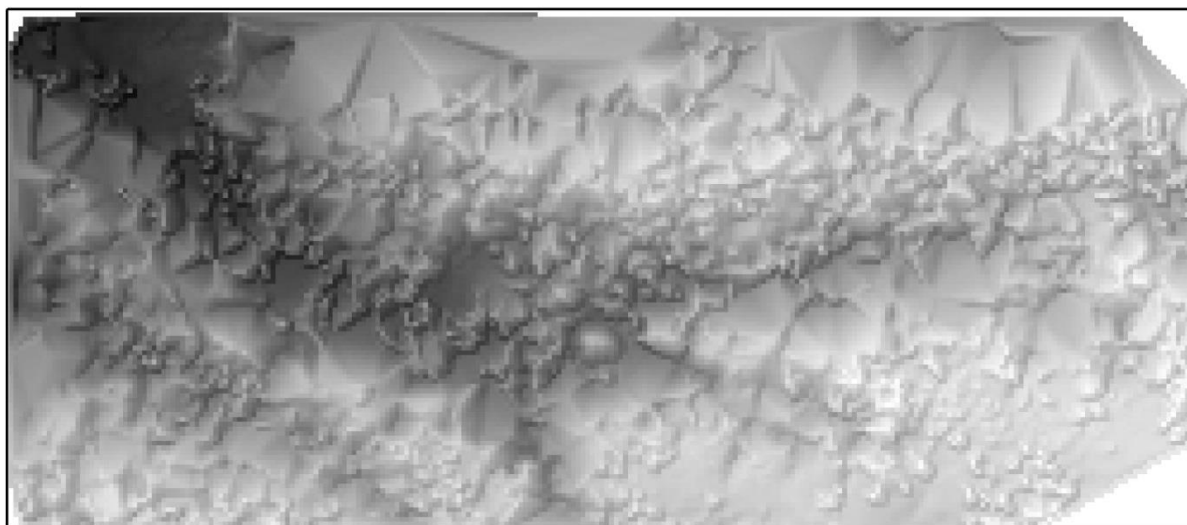


min -51,31 m  
max 40,00 m

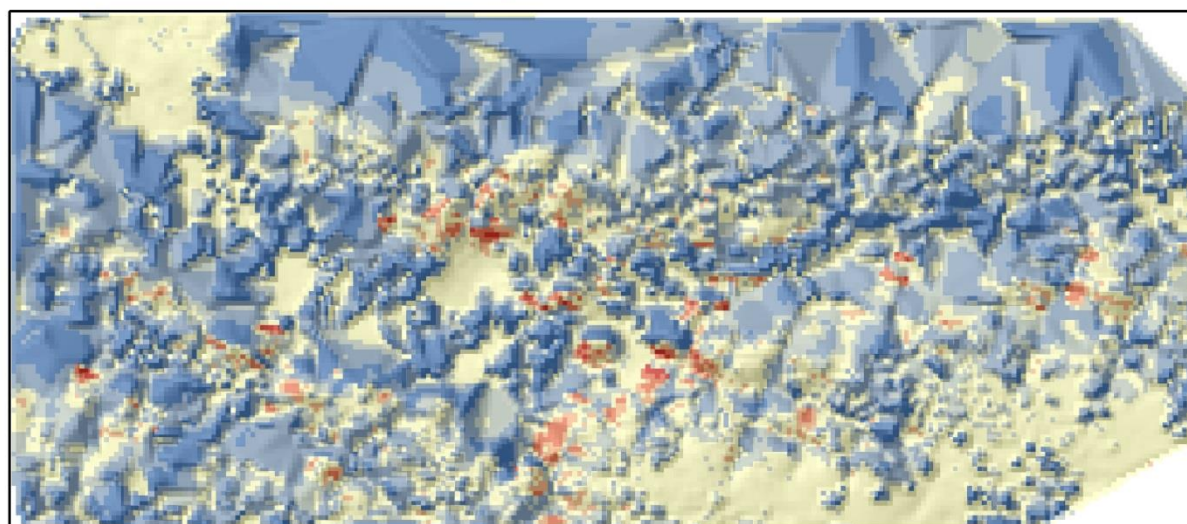


**Prachovské skály (střed, 2008) - varianta 1**

**Vytvořený DMR**



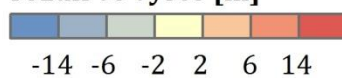
**Rozdíl vytvořeného DMR s DMR 5G**



0 100 m



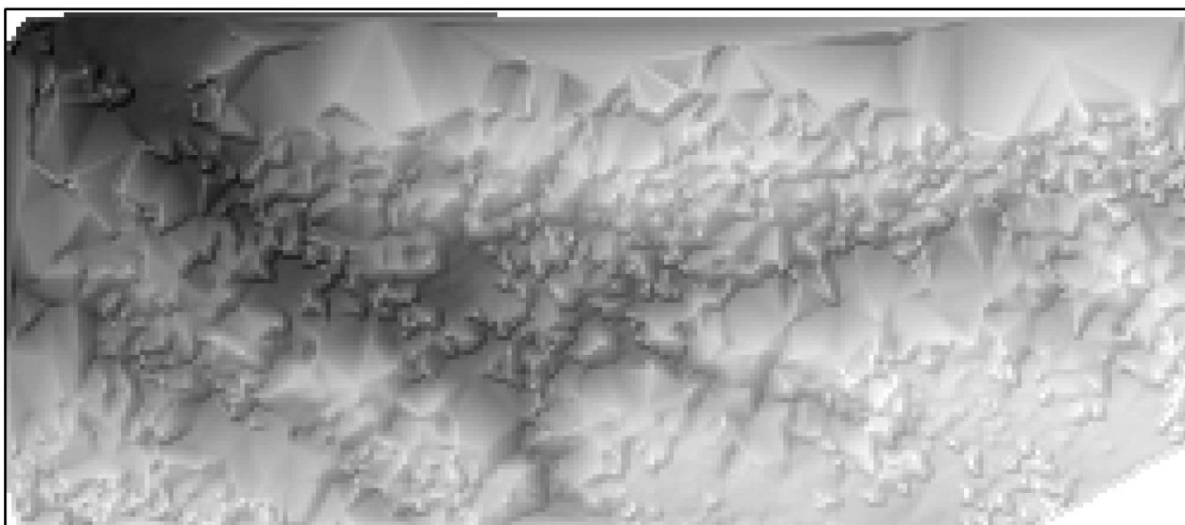
**rozdíl ve výšce [m]**



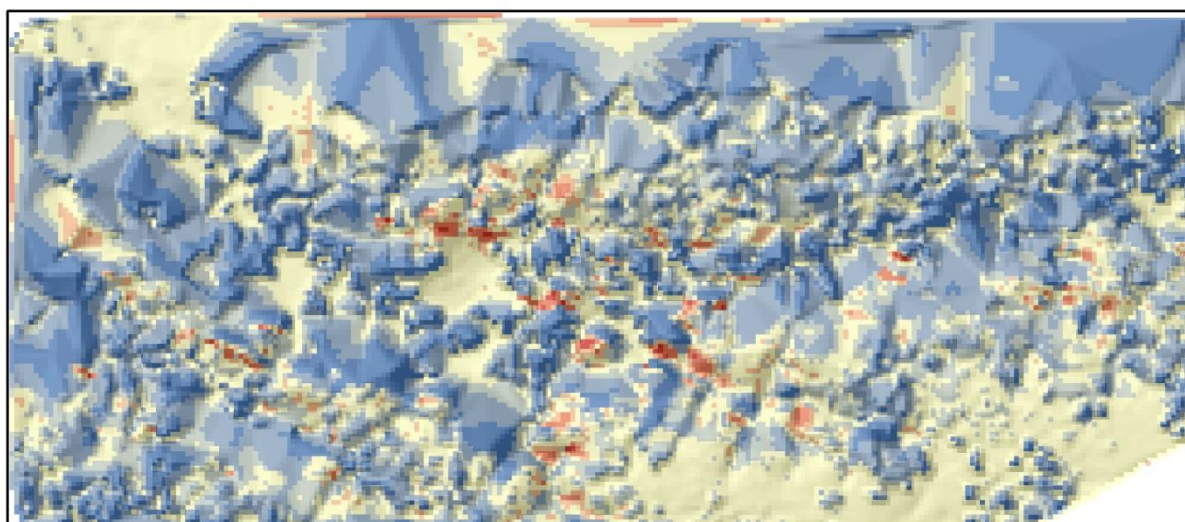
min -37,29 m  
max 26,03 m

**Prachovské skály (střed, 2008) – varianta 2**

**Vytvořený DMR**



**Rozdíl vytvořeného DMR s DMR 5G**



0 100 m



**rozdíl ve výšce [m]**



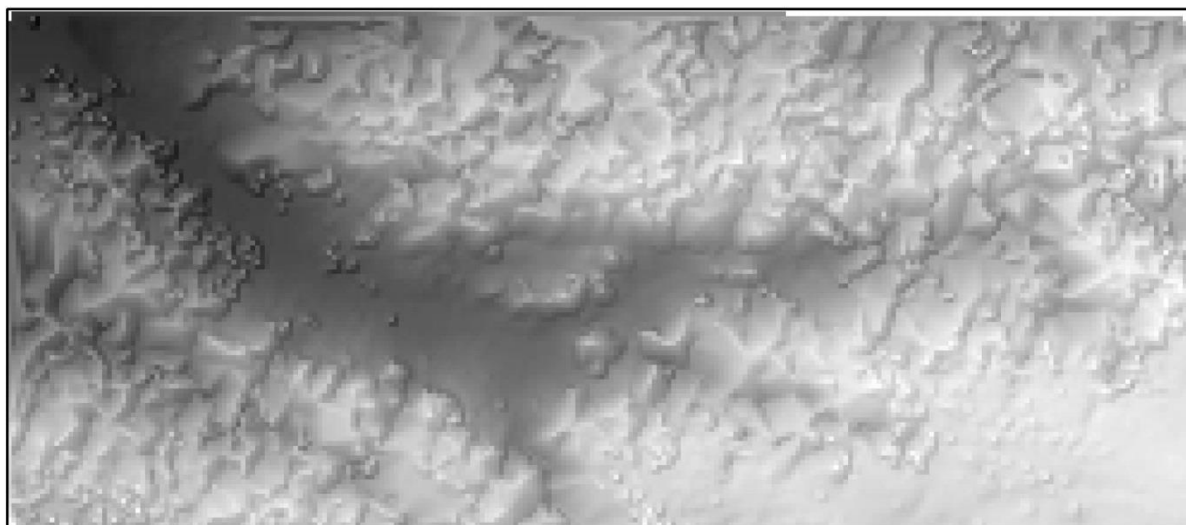
min -37,29 m

max 25,53 m

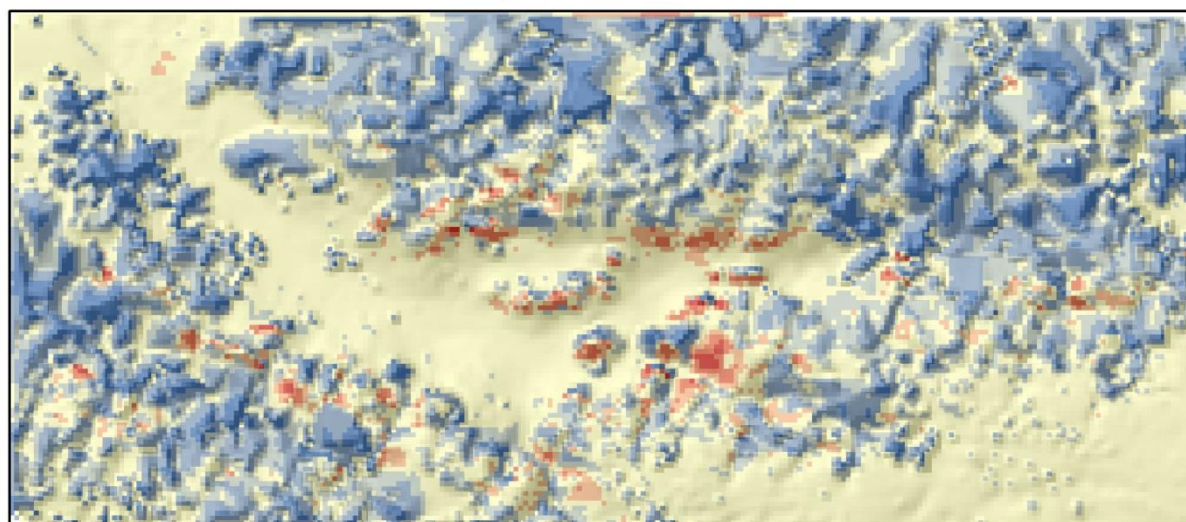


**Prachovské skály (střed, 2010) - varianta 1**

**Vytvořený DMR**

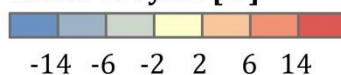


**Rozdíl vytvořeného DMR s DMR 5G**



0 100 m

**rozdíl ve výšce [m]**

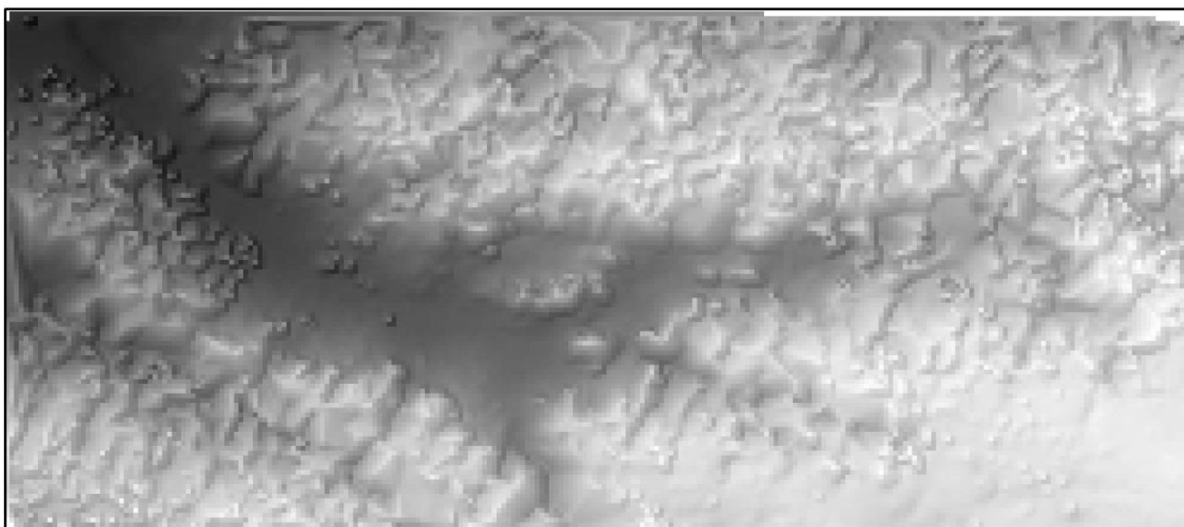


min -34,66 m

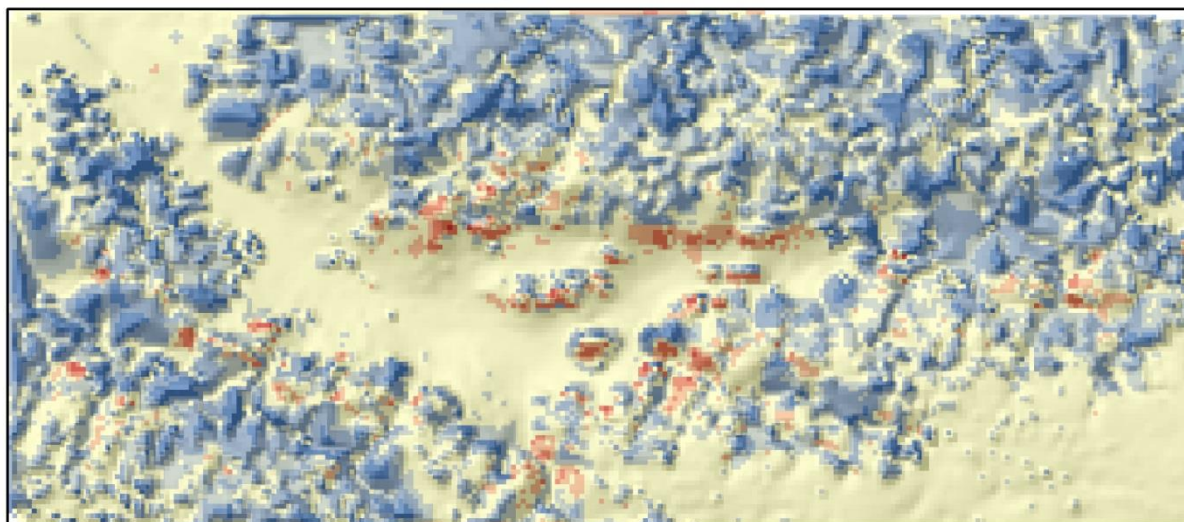
max 26,55 m

**Prachovské skály (střed, 2010) – varianta 2**

**Vytvořený DMR**



**Rozdíl vytvořeného DMR s DMR 5G**



0 100 m

**rozdíl ve výšce [m]**

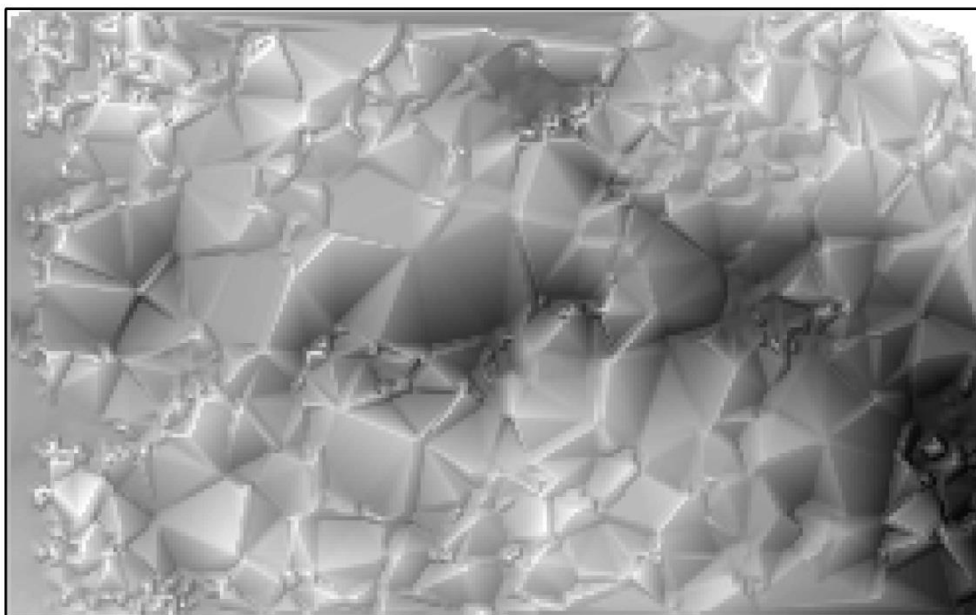


min -34,66 m

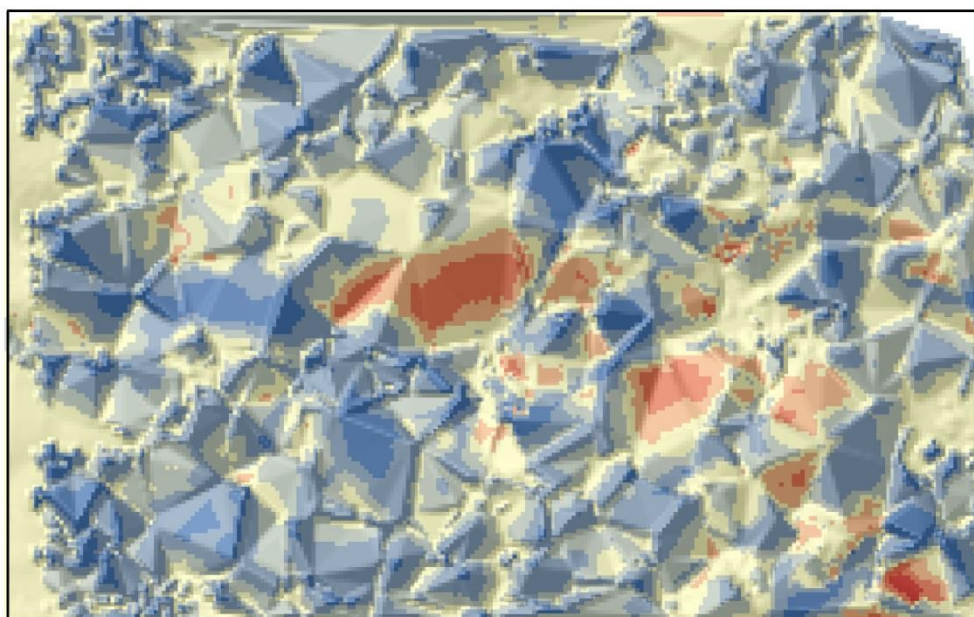
max 27,50 m

**Prachovské skály (Babinec, 2008) – varianta 1**

**Vytvořený DMR**

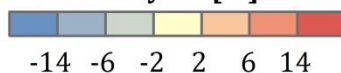


**Rozdíl vytvořeného DMR s DMR 5G**



0 50 m

**rozdíl ve výšce [m]**

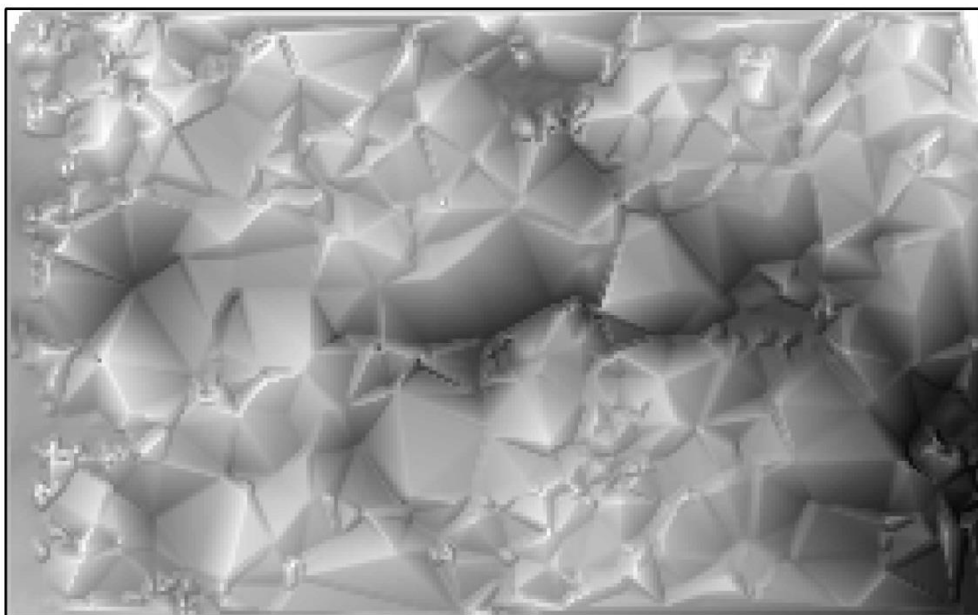


min -29,19 m  
max 20,65 m

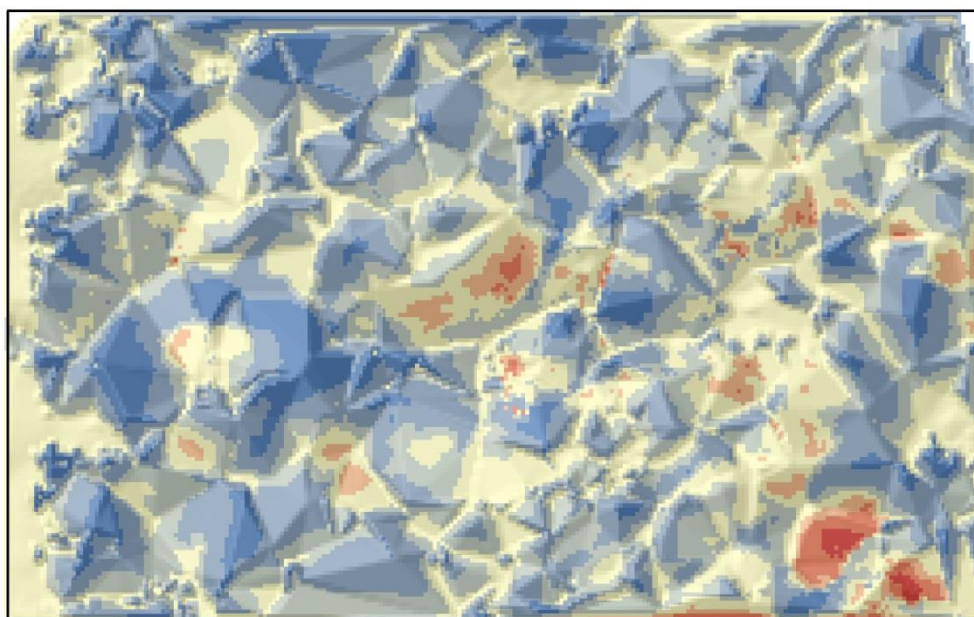


**Prachovské skály (Babinec, 2008) – varianta 2**

**Vytvořený DMR**

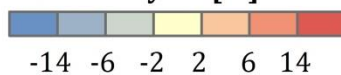


**Rozdíl vytvořeného DMR s DMR 5G**



0 50 m

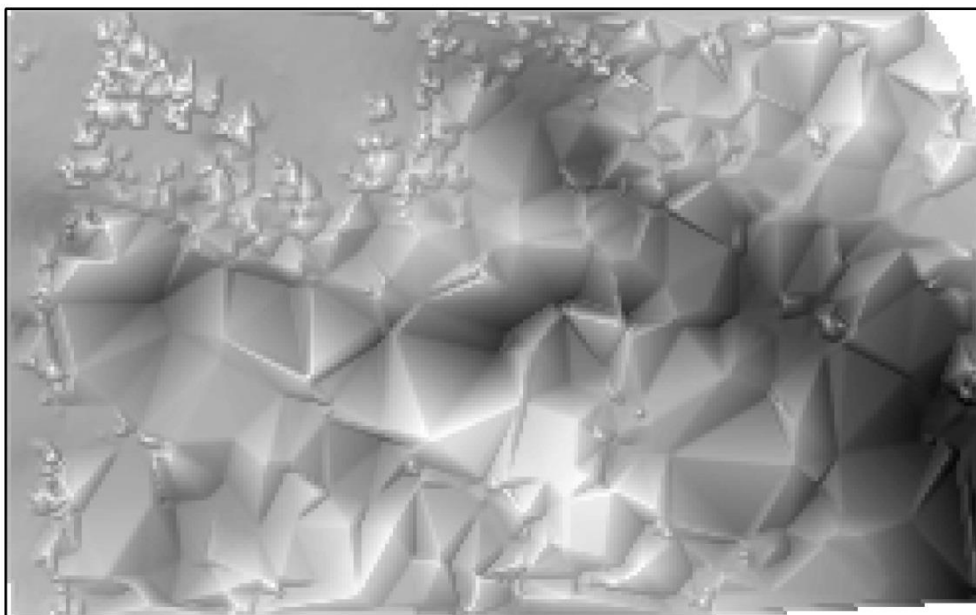
**rozdíl ve výšce [m]**



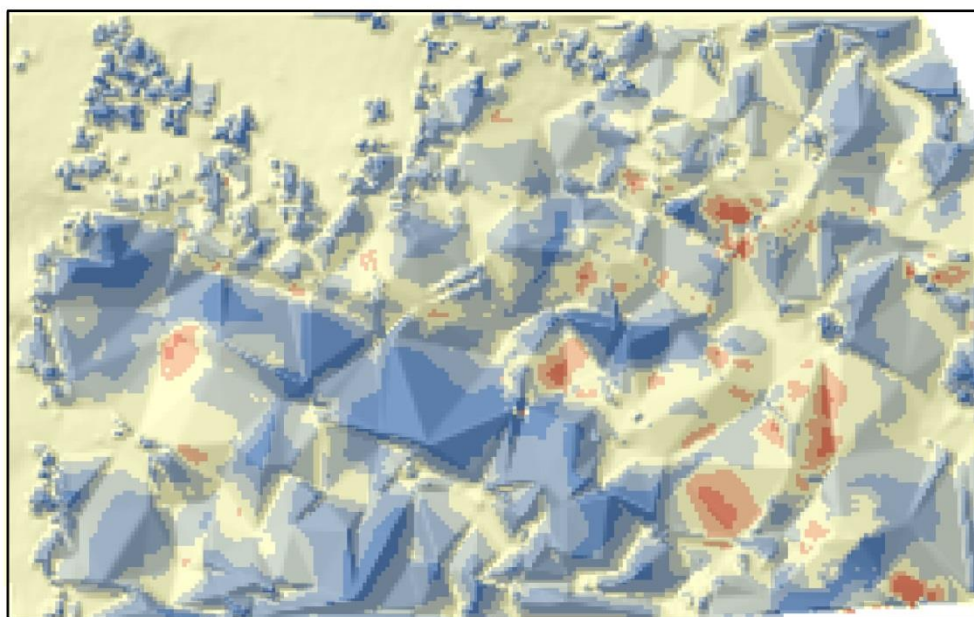
min -30,16 m  
max 20,09 m

**Prachovské skály (Babinec, 2010) – varianta 1**

**Vytvořený DMR**

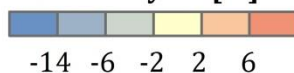


**Rozdíl vytvořeného DMR s DMR 5G**



0 50 m

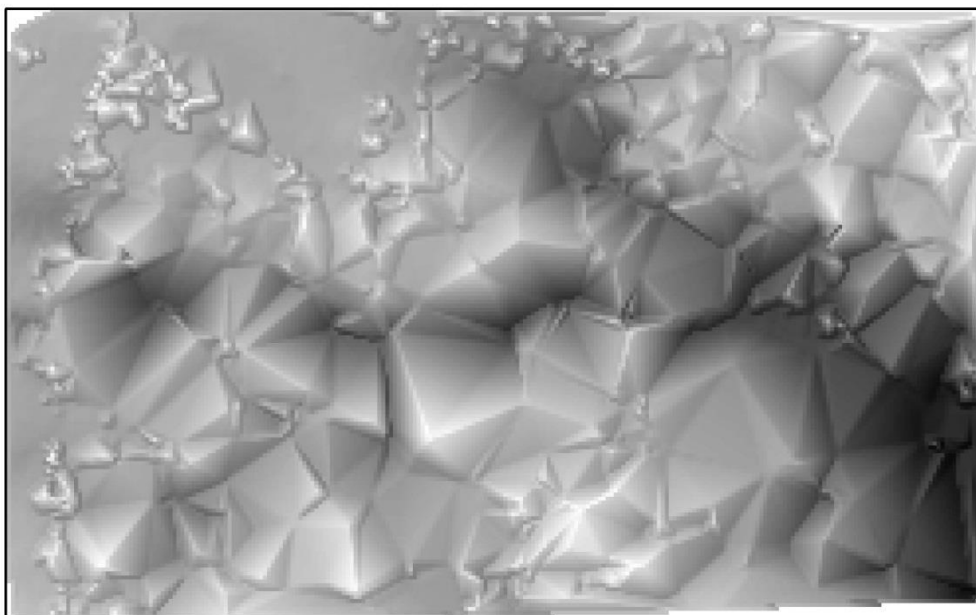
**rozdíl ve výšce [m]**



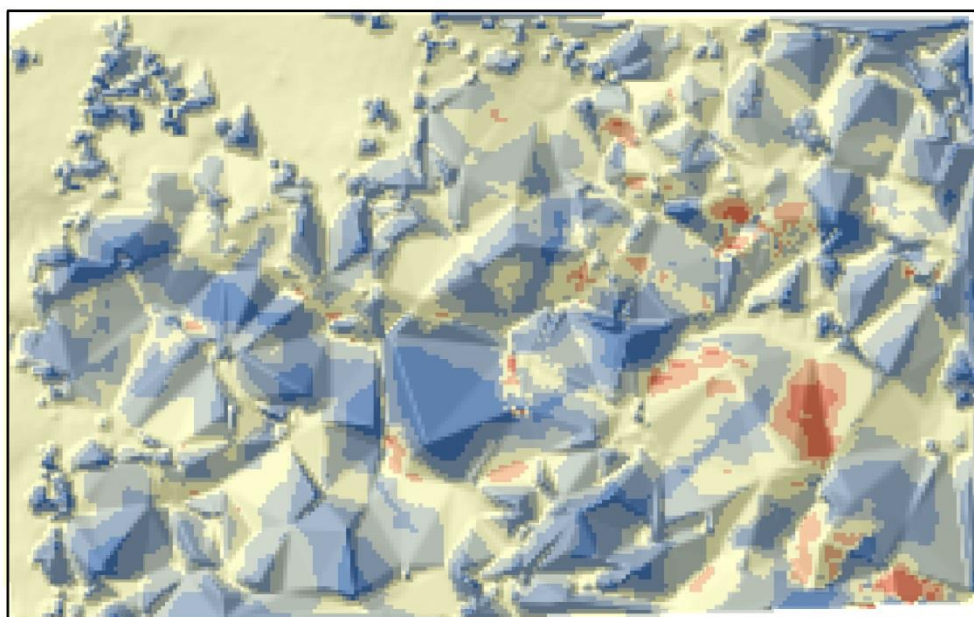
min -32,08 m  
max 12,77 m

**Prachovské skály (Babinec, 2010) – varianta 2**

**Vytvořený DMR**

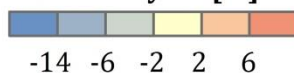


**Rozdíl vytvořeného DMR s DMR 5G**



0 50 m

**rozdíl ve výšce [m]**



min -32,71 m  
max 13,26 m



### **Příloha 3: Obsah přiloženého DVD**

- Text práce ve formátu PDF
- Vytvořené DMR
- Obrazové přílohy
- Použité skripty